



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES (TERRACEO Y SOIL NAILING) TOMANDO EN CUENTA LOS COSTOS DE MOVIMIENTOS DE TIERRAS EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DE ESCOMBRERAS”

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:
MAGISTER EN GEOTECNIA

Presentado por:
CRISTIAN DANILO BUSTOS CABRERA
ITALO MEDARDO DUTAN SANANGO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO - 2021

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con profundo amor y cariño a mi amada esposa Sonia, por su apoyo incondicional, pues sin ella no lo podía haber logrado la meta propuesta que me lo planteo al inicio de aceptar este nuevo reto en vida.

A mis hijas Catalina y Fiorella, que son el origen de inspiración y motivación, para seguir preparándome y así superarme día a día, para enfrentar los retos a futuro.

ITALO

Este trabajo lo dedico Dios por darme la fortaleza para seguir adelante cumpliendo mis sueños, para que este nuevo logro sirva de inspiración en un continuo aprendizaje profesional, personal y espiritual.

DANILO

AGRADECIMIENTO

El desarrollo de este proyecto ha contado con el apoyo del personal docente de la ESPOL, en especial del PhD. Jaime Bojorque como tutor; de igual manera se ha logrado llevar a cabo el trabajo gracias a la colaboración del MTOP – Z6, por la valiosa información facilitada por su equipo técnico.

TRIBUNAL

Tutor:
PHD. JAIME ASDRUBAL BOJORQUE IÑEGUEZ

Evaluador:
MSC. CARLOS ANDRÉS GRAU SACOTO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Cristian Danilo Bustos Cabrera

Ítalo Medardo Dután Sanango

RESUMEN

En los últimos años la región austral del país ha soportado varios cierres de vías debido a la presencia de taludes inestables que generan deslaves, especialmente, en la temporada invernal. El presente trabajo analiza la estabilidad de dos taludes de la autopista Cuenca – Azogues – Biblián, el Talud 12 de Octubre y el Talud del IESS, ambos ubicados en la red vial estatal E35. Se plantea la hipótesis de una posible ampliación de la carretera, por lo que se genera un corte en los taludes y se proponen dos alternativas de estabilización, a saber; terraceo y soil nailing, a fin de comparar los costos de construcción de cada una de las alternativas tomando como variable la distancia a la escombrera, para finalmente identificar las condiciones en las cuales es conveniente utilizar la técnica de soil nailing para la estabilización de taludes. Del estudio se puede mencionar que previo a definir un diseño de estabilización es importante considerar alternativas de solución tomando en cuenta aspectos como: costos de construcción, disponibilidad de áreas de trabajo, tiempo de construcción, distancia y disponibilidad de sitios para escombrera; y, aspectos sociales. En este sentido la estabilización con soil nailing es una alternativa válida ya que genera menores movimientos de tierras, requiere de menores áreas de operatividad e intervención, generando menores impactos sociales.

ABSTRACT

In recent years, the southern region of the country has suffered several road closures due to the presence of unstable slopes that generate landslides, especially in the winter season. This document analyzes the stability of two slopes of the Cuenca - Azogues - Biblián highway, the 12 de Octubre slope and the IESS slope, both located on the E35 state road network. The hypothesis of a possible widening of the road is proposed, for which a cut is generated in the slopes and two stabilization alternatives are proposed, namely; Terraced and soil nailing, in order to compare the construction costs of each alternative taking the distance to the dump as a variable, to finally identify the conditions in which it is convenient to use the nailed soil technique for slope stabilization. From the study it can be mentioned that prior to defining a stabilization design it is important to consider alternative solutions taking into account aspects such as: construction costs, availability of work areas, construction time, distance and availability of sites for dump; and, social aspects. In this sense, stabilization with soil nailing is a valid alternative since it generates fewer earthworks, requires fewer areas of operation and intervention, generating fewer social impacts.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 1.1. Antecedentes | 12 |
| 1.2. Introducción y justificación | 12 |
| 1.3. Objetivos | 15 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 15 |
| 1.3.2. Objetivos específicos..... | 15 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 15 |
| 2.1. Resistencia del suelo | 17 |
| 2.2. Tipos de movimientos en masa | 17 |
| 2.2.1. Caída (Fall)..... | 18 |
| 2.2.2. Volcamiento (Toppling)..... | 18 |
| 2.2.3. Deslizamiento (Slide)..... | 19 |
| 2.2.3.1. Deslizamiento Traslacional (Translational slide)..... | 19 |
| 2.2.3.2. Deslizamiento Rotacional..... | 20 |
| 2.2.4. Propagación lateral (Lateral Spread)..... | 21 |
| 2.2.5. Flujos (Flow) | 21 |
| 2.2.5.1. Flujos secos | 22 |
| 2.2.5.2. Flujos de detritos..... | 22 |
| 2.2.5.3. Crecida de detritos | 22 |
| 2.2.5.4. Flujo de lodos | 22 |
| 2.2.5.5. Flujo de tierra | 22 |
| 2.2.5.6. Deslizamiento por flujo | 22 |
| 2.2.5.7. Avalancha de detritos | 22 |
| 2.2.5.8. Avalancha de rocas | 22 |
| 2.3. Estabilidad de taludes | 23 |
| 2.3.1. Factores que inciden en la estabilidad de los taludes en suelo | 23 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.3.2. | Causas de inestabilidad..... | 24 |
| 2.3.3. | Métodos de estabilización | 25 |
| 2.3.3.1. | Reconformación de talud (Terraceo)..... | 26 |
| 2.3.3.2. | Soil Nailing (Suelo claveteado)..... | 26 |
| 2.3.3.2.1. | Procedimiento de construcción..... | 26 |
| 2.3.3.2.2. | Ventajas y desventajas de la técnica “soil nailing” | 27 |
| 3. | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO TALUD 12 DE OCTUBRE..... | 28 |
| 3.1. | Ubicación..... | 29 |
| 3.2. | Geología | 29 |
| 3.3. | Clima | 30 |
| 3.4. | Sismicidad | 30 |
| 3.5. | Estado actual de la infraestructura..... | 32 |
| 3.6. | Proyecto de intervención..... | 33 |
| 3.7. | Exploración Geotécnica..... | 33 |
| 3.8. | Caracterización geomecánica de los suelos..... | 35 |
| 3.9. | Análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales | 36 |
| 3.10. | Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con terraceo..... | 38 |
| 3.10.1. | Análisis en condición estática | 38 |
| 3.10.2. | Análisis en condición pseudo estática | 40 |
| 3.11. | Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con soil nailing..... | 42 |
| 3.11.1. | Prediseño | 43 |
| 3.11.2. | Diseño final | 48 |
| 3.11.2.1. | Estabilidad global, análisis en condición estática | 48 |
| 3.11.2.2. | Estabilidad global, análisis en condición pseudo estática | 49 |
| 4. | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO TALUD SECTOR IESS | 49 |
| 4.1. | Ubicación..... | 49 |
| 4.2. | Geología | 50 |
| 4.3. | Clima | 51 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 4.4. | Estado actual de la infraestructura..... | 51 |
| 4.5. | Proyecto de intervención..... | 51 |
| 4.6. | Exploración Geotécnica..... | 52 |
| 4.7. | Caracterización geomecánica de los suelos..... | 54 |
| 4.8. | Análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales | 55 |
| 4.9. | Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con terraceo..... | 57 |
| 4.9.1. | Análisis en condición estática | 57 |
| 4.9.2. | Análisis en condición pseudo estática | 58 |
| 4.10. | Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con soil nailing..... | 58 |
| 4.10.1. | Prediseño | 59 |
| 4.10.2. | Diseño final. | 64 |
| 4.10.2.1. | Estabilidad global, análisis en condición estática. | 65 |
| 4.10.2.2. | Estabilidad global, análisis en condición pseudo estática. | 65 |
| 5. | COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN..... | 66 |
| 5.1. | Costos de construcción | 66 |
| 5.2. | Costos de movimiento de tierras..... | 66 |
| 5.3. | Análisis de variación de costo de las alternativas de diseño. | 70 |
| 6. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 71 |
| 7. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 73 |
| 8. | ANEXOS | 75 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Deslizamientos en la vía Cuenca – Molleturo – El Empalme (Diario El Mercurio, 2021). | 12 |
| Figura 2: Estabilización de talud en el redondel 12 de Octubre (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2019) | 13 |
| Figura 3: Deslizamiento en la vía Cuenca – Girón – Pasaje (Diario Expreso, 2019). | 14 |
| Figura 4: Esquema de construcción de soil nailing (Keller, 2021)..... | 14 |
| Figura 5: Nomenclatura de un Talud (Suarez Diaz, 1998). | 16 |
| Figura 6: Nomenclatura de Ladera (Suarez Diaz, 1998). | 16 |
| Figura 7: Esquema de caída de rocas (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007) | 18 |
| Figura 8: Esquema de volcamiento (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007) | 19 |
| Figura 9: Esquema de deslizamiento planar (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007) | 20 |
| Figura 10: Esquema de un deslizamiento rotacional (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007) | 20 |
| <i>Figura 11: Esquema propagación lateral</i> (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007) | 21 |
| <i>Figura 12: Esquema flujos</i> (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007)..... | 23 |
| Figura 13: Comparación de costos de construcción para varios sistemas de estabilización (Carlos A. Lazarte, Victor Elias, R. David Espinoza, & Paul J. Sabatini, 2003) | 26 |
| Figura 14: Procedimiento constructivo del Soil Nailing (Carlos A. Lazarte, Helen Robinson, Jesús E. Gómez, & Andrew Baxter, 2015) | 27 |
| Figura 15: Ubicación talud 12 de Octubre, imagen Google Earth..... | 29 |
| Figura 16: Zonas sísmicas para un período de retorno de 475 años. Fuente: (NEC, 2015). | 31 |
| Figura 17: Aceleración sísmica para la ciudad de Cuenca, período de retorno de 475 años. Fuente: (NEC, 2015)..... | 32 |
| Figura 18: Estado actual, talud redondel 12 de Octubre. | 32 |
| Figura 19: Propuesta de ampliación, Redondel 12 de Octubre. | 33 |
| Figura 20: Croquis de ubicación de ensayos de campo (MTOPE, 2021) | 34 |
| Figura 21: Detalle de ubicación de ensayos de campo en el talud (MTOPE, 2021)..... | 34 |
| Figura 22: Perforación geotécnica sector 12 de Octubre, PO5 (MTOPE, 2021). | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 23: Estabilidad en condiciones actuales, talud 12 de Octubre. | 37 |
| Figura 24: Estabilidad en condiciones actuales, talud 12 de Octubre. | 38 |
| Figura 25: Sección del talud 12 de Octubre – Propuesta de terraceo | 39 |
| Figura 26: Análisis de estabilidad global (estático), talud 12 de Octubre..... | 39 |
| Figura 27: Análisis pseudo estático, terraceo talud 12 de Octubre. | 42 |
| Figura 28: Geometría del talud propuesto – Soil nailing, talud 12 de Octubre. | 43 |
| Figura 29: L/H y tmax-s para un talud de 10° (Lazarte et al, 2003)..... | 45 |
| Figura 30: Geometría del talud para generar el ábaco (Lazarte et al, 2003). | 46 |
| Figura 31: Factores para corrección por el diámetro de perforación (Lazarte et al, 2003). | 46 |
| Figura 32: Estabilidad global – soil nail – análisis estático. | 48 |
| Figura 33: Estabilidad global – soil nail – análisis pseudo estático | 49 |
| Figura 34: Ubicación talud IESS, imagen Google Earth. | 50 |
| Figura 35: Autopista Cueca – Azogues – Biblián, sector del redondel IESS. | 51 |
| Figura 36: Propuesta de ampliación, Redondel IESS..... | 52 |
| Figura 37: Plano de campaña de exploración geotécnica (MTO, 2021). | 53 |
| Figura 38: Perfil de exploración geotécnica, talud IESS (MTO, 2021). | 53 |
| Figura 39: Muro de contención de pie del talud IESS, fuente: GOOGLE EARTH. | 55 |
| Figura 40: Estabilidad en condiciones actuales, talud IESS. | 56 |
| Figura 41: Estabilidad en condiciones actuales con carga sísmica, talud IESS..... | 56 |
| Figura 42: Geometría de la propuesta de terraceo - talud IESS..... | 57 |
| Figura 43: Propuesta de terraceo, análisis en condición estática - talud IESS..... | 57 |
| Figura 44: Análisis pseudo estático, terraceo talud IESS..... | 58 |
| Figura 45: Geometría del talud propuesto – Soil nail, talud IESS..... | 59 |
| Figura 46: L/H y tmax-s para un talud de 10° (Lazarte et al, 2003)..... | 62 |
| Figura 47: Geometría del talud para generar el ábaco (Lazarte et al, 2003). | 63 |
| Figura 48: Factores para corrección por el diámetro de perforación (Lazarte et al, 2003). | 63 |
| Figura 49: Estabilidad global – soil nail – análisis estático, talud IESS. | 65 |
| Figura 50: Estabilidad global – soil nail – análisis pseudo estático, talud IESS. | 66 |
| Figura 51: Comparación de costos de construcción, talud 12 de Octubre. | 70 |
| Figura 52: Comparación de costos de construcción, talud IESS. | 71 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Detalle de causas de los movimientos del terreno (Cruden & Varnes, 1996) | 24 |
| Tabla 2: Resultados de prospección geofísica, talud 12 de Octubre. Fuente: (MTOPI, 2021). 33 | |
| Tabla 3: Resumen de resultados de ensayos de laboratorio, talud 12 de Octubre. Fuente: (MTOPI, 2021) | 35 |
| Tabla 4: Parámetros geomecánicos, talud 12 de Octubre. Fuente: (MTOPI, 2021). | 36 |
| Tabla 5: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada, (NEC, 2015). | 40 |
| Tabla 6: Clasificación de los perfiles de suelo (NEC, 2015). | 41 |
| Tabla 7: Tipo de suelo y Factores de sitio Fa (NEC, 2015). | 41 |
| Tabla 8: Resistencia al arrancamiento para Soil Nail en suelo y roca. (Elias & Juran, 1991). .. | 44 |
| Tabla 9: Resultados de prospección geofísica, talud IESS. Fuente: (MTOPI, 2021). | 52 |
| Tabla 10: Resumen de resultados de ensayos de laboratorio. Fuente: (MTOPI, 2021). | 53 |
| Tabla 11: Parámetros geomecánicos, talud IESS. Fuente: (MTOPI, 2021). | 55 |
| Tabla 12: Resistencia al arrancamiento para Soil Nail en suelo y roca. (Elias & Juran, 1991) . | 60 |
| Tabla 13: Ángulos de fricción interna (Das, 1999). | 61 |
| Tabla 14: Costo de construcción – terraceo, talud 12 de octubre (10 km)..... | 67 |
| Tabla 15: Costo de construcción – terraceo, talud 12 de octubre (20 km)..... | 67 |
| Tabla 16: Costo de construcción – terraceo, talud 12 de octubre (25 km)..... | 68 |
| Tabla 17: Costo de construcción – soil nailing, talud 12 de octubre (25 km). | 68 |
| Tabla 18: Costo de construcción – terraceo, talud IESS (10 km)..... | 68 |
| Tabla 19: Costo de construcción – terraceo, talud IESS (20 km)..... | 69 |
| Tabla 20: Costo de construcción – terraceo, talud IESS (94 km)..... | 69 |
| Tabla 21: Costo de construcción – soil nailing, talud IESS (94 km). | 69 |
| Tabla 22: Comparación de costos de construcción, talud 12 de Octubre. | 70 |
| Tabla 23: Comparación de costos de construcción, talud IESS..... | 71 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El transporte es uno de los principales sectores que aportan a la economía del estado, con una media del 8.10% del Producto Interno Bruto. La aseveración de que: “Sin transporte no hay desarrollo”, se convierte en realidad ya que permite la movilidad de bienes y personas para todas las actividades que se realizan en el mundo moderno; el transporte terrestre utiliza una red de infraestructura construida para la movilización de mercancías y personas. La implementación de planes de mantenimiento o rehabilitación de carreteras incrementa la velocidad media de circulación y esto se traduce en: reducción de tiempos de viaje, menor deterioro de vehículos, ahorro de combustible para el usuario y el país, y finalmente menores precios de mercancías que son transportadas por carretera (Secretaría Nacional de Planificación, 2007).

1.2. Introducción y justificación

La red vial del austro del país, debido a la topografía y formación geológica de la zona, específicamente en las provincias de Azuay y Cañar, requiere de continuas actividades de mantenimiento para la estabilización o limpieza de los taludes generados durante su construcción, ya que estos presentan deslizamientos que requieren limpieza y con los consecuentes cierres de vías si no se las realiza a tiempo, por lo que los usuarios deben tomar vías alternes con una mayor distancia de recorrido. Por ejemplo, durante el período de agosto a octubre de 2021, a lo largo de la vía Cuenca – Molleturo – El Empalme se han presentado diferentes eventos que han requerido el mantenimiento correspondiente, como se muestra en la Figura 1 (Diario El Mercurio, 2021).

Las obras de estabilización representan un alto costo de inversión para las entidades que tienen bajo su responsabilidad estas tareas, la ejecución de los trabajos de movimiento de tierras presenta además mayores dificultades debido a los altos volúmenes de material que deben ser desalojados y por ende a la necesidad de localizar escombreras adecuadas, con las consecuentes dificultades técnicas, sociales y ambientales que esto conlleva.



Figura 1: Deslizamientos en la vía Cuenca – Molleturo – El Empalme (Diario El Mercurio, 2021).

La intervención en taludes comúnmente se desarrolla con la conformación de terrazas (terraceo) que reducen la pendiente del talud para garantizar su estabilidad; la Autopista Cuenca – Azogues – Biblián no se encuentra exenta a la problemática de estabilidad de taludes, los taludes existentes en diferentes sectores requieren intervenciones urgentes de las entidades responsables de la infraestructura vial, desarrollando planes de contingencia y cierres de vías (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2019), un ejemplo se observa en la Figura 2, correspondiente a una intervención realizada en el año 2019 a un talud de la Autopista Cuenca – Azogues – Biblián en el sector del redondel 12 de Octubre.



Figura 2: Estabilización de talud en el redondel 12 de Octubre (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2019)

La presencia de deslizamientos y cierres de vías, específicamente en la red vial del austro del país, es recurrente, es así que las principales vías que conectan a las ciudades de Cuenca y Azogues, capitales de las provincias de Azuay y Cañar respectivamente, con las capitales de las provincias cercanas como Guayaquil, Machala, Loja y Macas, tienen problemáticas similares, en especial durante la temporada invernal, donde se observan deslizamientos como el que se presentó en la vía Cuenca – Girón Pasaje en el año 2019 (Diario Expreso, 2019).



Figura 3: Deslizamiento en la vía Cuenca – Girón – Pasaje (Diario Expreso, 2019).

La red vial estatal conecta a importantes ciudades del país, principalmente a capitales provinciales, por lo que, considerar la utilización de métodos de estabilización que permitan intervenciones con menor área de maniobra debido a la limitación de espacio, es fundamental a fin de que se permita el flujo vehicular durante la ejecución de trabajos. Una alternativa para la estabilización de taludes es la técnica de suelo claveteado (soil nailing, Figura 4), metodología que utiliza un sistema de anclajes pasivos que son instalados desde la parte superior del talud hasta llegar al nivel deseado (Keller, 2021).

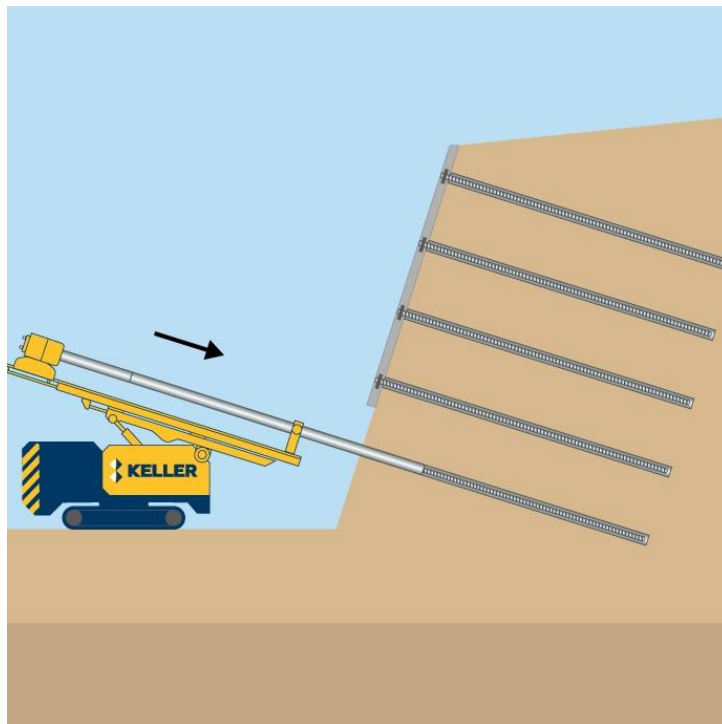


Figura 4: Esquema de construcción de soil nailing (Keller, 2021)

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es determinar el impacto de los costos de construcción por la utilización de dos alternativas de diseño de estabilización de taludes (terraceo y anclaje), para los taludes ubicados en los redondeles IESS y 12 de Octubre de la Autopista Cuenca – Azogues – Biblián; tomando en cuenta los costos de movimiento de tierras en función de la distancia a las escombreras.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar el diseño de estabilización mediante la construcción de taludes con pendientes adecuadas y bermas (terraceo).
- Realizar el diseño para la estabilización mediante el reforzamiento del suelo con la utilización de soil nailing o suelo claveteado.
- Comparación de costos de construcción y determinación del punto de equilibrio en la distancia máxima a la que podría estar ubicada la escombrera para la intervención con movimiento de tierras.

Para el cumplimiento de los objetivos se plantea como hipótesis la ampliación de la autopista Cuenca – Azogues – Biblián, con la implementación de un carril adicional en cada sentido. El análisis considera los costos de construcción que representará el movimiento de tierras y la estabilización de los taludes intervenidos luego de la ampliación proyectada, se realizarán dos propuestas de estabilización para finalmente comparar los costos de construcción de cada una y la influencia de las actividades de transporte de material en el costo total del proyecto.

2. MARCO TEÓRICO

Se conoce como talud a una superficie inclinada que se forma en el terreno de manera permanente o provisional, sean estos artificiales por acción antrópica o naturales (Valiente, Díaz, & Sobrecases, 2015).

Para Álvaro De Matteis (2003) el talud se produce de forma natural, sin la intervención humana, y se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación, en el corte se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes (De Matteis, 2003).

El tránsito vehicular en carreteras es frecuentemente perturbado por daños resultantes de lluvias fuertes o terremotos, estas perturbaciones son causadas mayormente por la falla de taludes (Asociación de carreteras del Japón, 1984).

En la construcción o ampliación de carreteras se requiere la intervención en taludes, ya sea en corte de terreno o relleno como terraplén, modificando la pendiente de los taludes naturales, por lo que es necesario analizar su estabilidad.

De acuerdo a las definiciones de talud, cuando se conformó artificialmente, y ladera, cuando su conformación tuvo como origen un proceso natural, Jaime Suarez J. (1998) define cada una de las partes que conforman el talud y la ladera, en concordancia con el detalle de nomenclatura que se muestra en la Figura 5 y en la Figura 6 (Suarez Diaz, 1998):

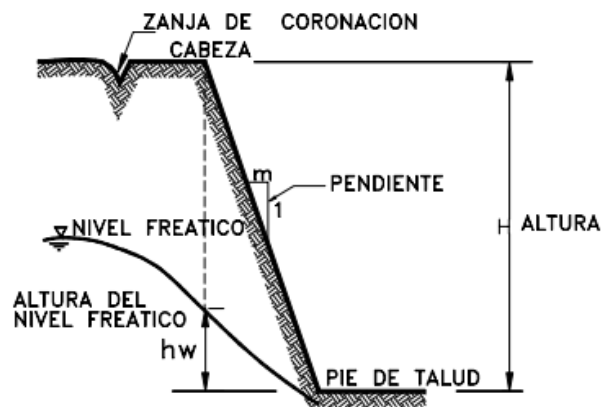


Figura 5: Nomenclatura de un Talud (Suarez Diaz, 1998).

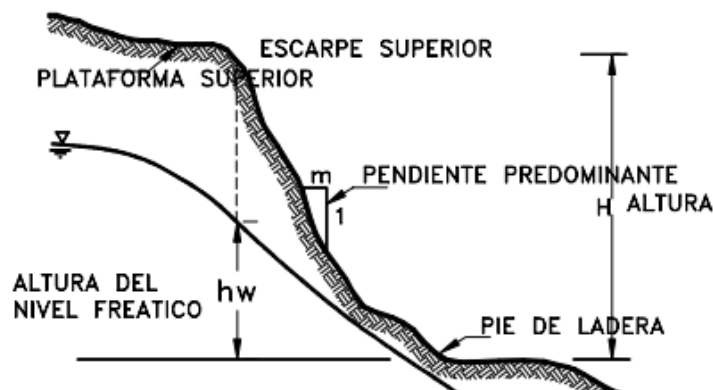


Figura 6: Nomenclatura de Ladera (Suarez Diaz, 1998).

Definiendo los siguientes elementos:

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

Pie: Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.

Cabeza o escarpe: Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

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

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

2.1. Resistencia del suelo

La *resistencia cortante* del suelo es la resistencia interna que la masa de suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él, factor que es fundamental para analizar los problemas de estabilidad del suelo. Mohr (1900) presentó la teoría de rotura de los materiales afirmando que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, la envolvente de falla es una línea curva, sin embargo, para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal, esta relación se escribe como (Das, 1999):

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

En donde:

τ_f = esfuerzo cortante sobre el plano de falla

c = cohesión

σ = esfuerzo normal sobre el plano de falla

ϕ = ángulo de fricción interna

2.2. Tipos de movimientos en masa

Los movimientos en masa corresponden a todo tipo de movimiento de material ladera abajo, sea estos rocas, detritos o suelos, algunos pueden ser lentos e imperceptibles, mientras otros pueden tener velocidades altas y con límites claros. Es importante la definición formal de aspectos que permitan diferenciar un tipo de movimiento de otro, las clasificaciones propuestas por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988) son hoy en día las más aceptadas, para establecer su propuesta

identifican el tipo de movimiento y el tipo de material, dividiendo los movimientos de masas en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos; los materiales se dividen en dos clases: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierra.

En la práctica es difícil asignar una clasificación particular a cierto movimiento, debido a que la mayoría de ellos presentan comportamientos complejos a lo largo de su trayectoria debido a las propiedades de los materiales involucrados (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

El Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007) en su publicación “Una Guía para la Evaluación de Amenazas” define los principales movimientos en masa como:

2.2.1. Caída (Fall)

Es un tipo de movimiento en el que varios bloques se desprenden de una ladera, sin que ocurra un desplazamiento cortante apreciable, dependiendo del material puede ser caída de roca o caída de suelo, el movimiento es muy rápido y para el caso de rocas sus velocidades son muy altas pudiendo exceder los 100m/s. Un aspecto importante es que este movimiento no es masivo, si bien existe interacción en la trayectoria de los fragmentos, no existe interacción mecánica entre ellos, el movimiento no es masivo ni del tipo flujo (Figura 7).

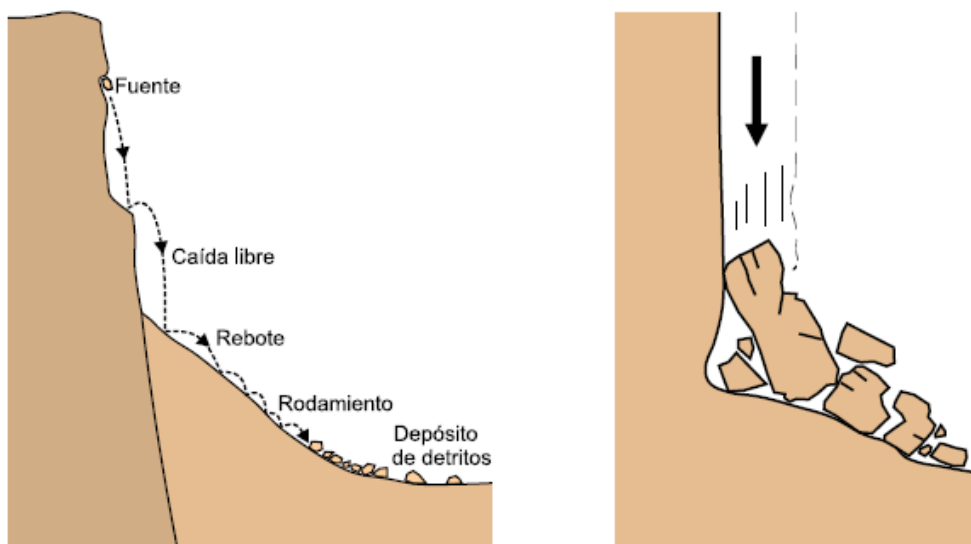


Figura 7: Esquema de caída de rocas (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

2.2.2. Volcamiento (Toppling)

En este tipo de movimiento existe una rotación de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto de giro inferior, se presenta por empuje de los bloques adyacentes debido a la

gravedad o por presión de fluidos en las grietas. Los movimientos pueden ser lentos y graduales (Figura 8).

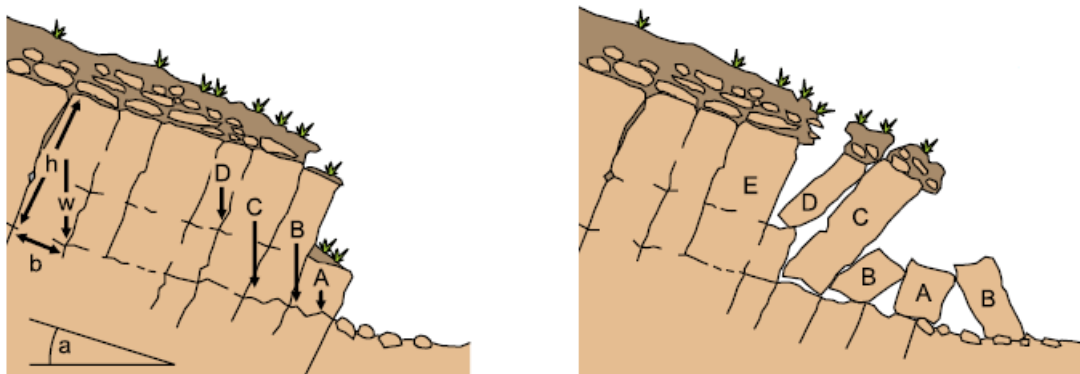


Figura 8: Esquema de volcamiento (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

2.2.3. Deslizamiento (Slide)

Es un movimiento de suelo o roca que ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla o una delgada zona donde se presenta una gran deformación cortante. Varnes (1978) clasifica los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla, en traslacionales y rotacionales, los primeros pueden ser planares o de cuña, sin embargo, las superficies de rotura pueden ser más complejas ya que se pueden presentar varios segmentos planares o curvos, en este caso se tienen deslizamientos compuestos.

2.2.3.1. Deslizamiento Traslacional (Translational slide)

Se presenta cuando el movimiento es a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada, por lo general son más superficiales que los deslizamientos rotacionales, el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que se encuentra sobre esta.

El deslizamiento se denomina planar (Figura 9) cuando se presenta a lo largo de un solo plano, mientras que cuando está delimitado por dos planos de discontinuidad se presenta el deslizamiento en cuña.

La velocidad de estos movimientos puede variar desde rápida a extremadamente rápida.

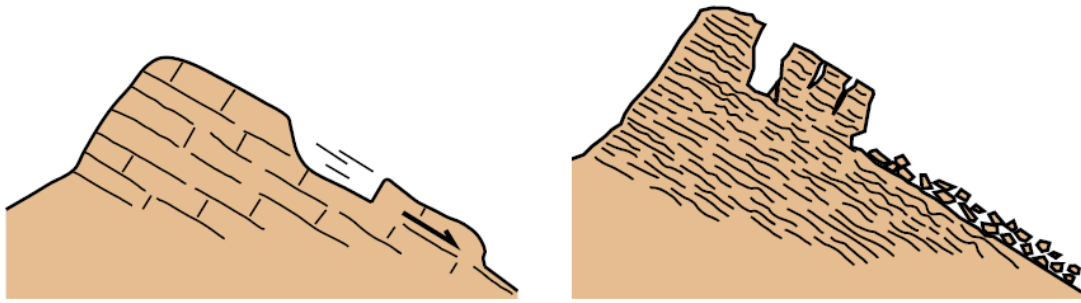


Figura 9: Esquema de deslizamiento planar (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

2.2.3.2. Deslizamiento Rotacional

En este tipo de deslizamiento la masa de suelo se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava, estos deslizamientos muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie en la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal, este tipo de movimientos pueden ocurrir lenta o rápidamente, con velocidades menores a 1 m/s; debido a que este tipo de movimientos son auto-estabilizantes, por lo general la tasa de movimiento es baja, excepto en presencia de materiales altamente frágiles como arcillas sensitivas (Figura 10).

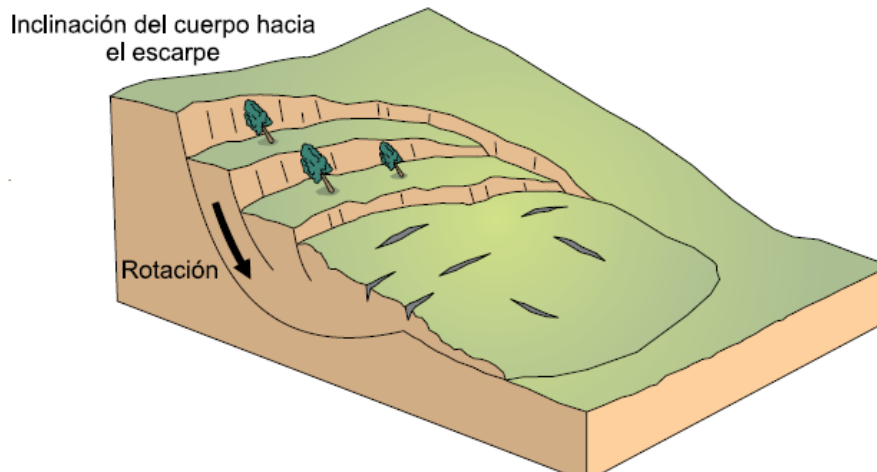


Figura 10: Esquema de un deslizamiento rotacional (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

Existen deslizamientos que no son enteramente rotacionales ni planares, estos se denominan deslizamientos compuestos, la superficie de rotura se desarrolla a lo largo de planos de plegamiento o por la intersección de discontinuidades, o por la combinación de superficies de ruptura y planos de debilidad de roca. El tipo más común de deslizamiento compuesto incluye movimiento rotacional a lo largo de un escarpe principal seguido de un desplazamiento a lo largo de una superficie de debilidad

casi horizontal, usualmente paralela a la estratificación en rocas sedimentarias, usualmente se caracterizan por pequeños escarpes y la formación de estructuras de “graben” o fosa, la cual se diferencia morfológicamente de los deslizamientos rotacionales.

2.2.4. Propagación lateral (Lateral Spread)

La propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa donde el desplazamiento ocurre por deformación interna del material (expansión), la mayoría de los deslizamientos y flujos involucran algún grado de expansión, las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final de una serie de movimientos donde la deformación interna predomina sobre otros tipos de desplazamientos. Es importante diferenciar entre las propagaciones laterales lentas como las que ocurren en estratos rocosos gruesos que sobreyacen a materiales blandos, y las que involucran licuación de materiales sensibles tales como arenas saturadas de densidad relativa baja a media o limos y arcillas sensitivas; en las primeras el estrato competente superior puede fracturarse y separarse en bloques o losas, el material blando inferior fluye hacia las grietas entre los bloques y así el movimiento de estos es extremadamente lento; las segundas, usualmente inducidas por terremotos, son extremadamente rápidas y peligrosas (Figura 11).

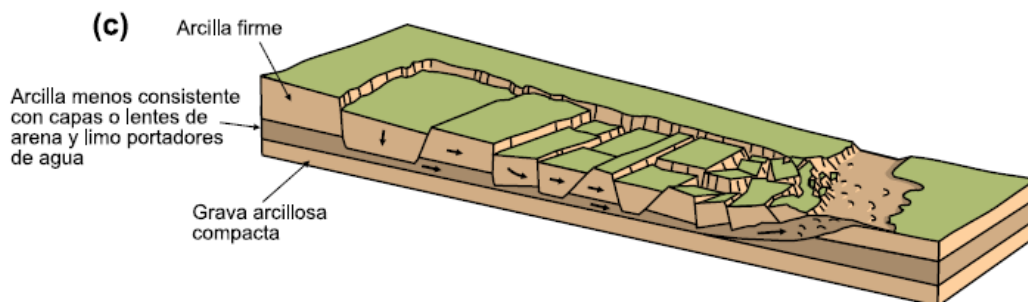


Figura 11: Esquema propagación lateral (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

2.2.5. Flujos (Flow)

Este tipo de movimiento en masa muestra un desplazamiento con comportamiento similar a un fluido, puede ser rápido o lento, seco o saturado, en muchos casos se presenta a partir de otro tipo de movimiento, ya sea de un deslizamiento o caída.

El flujo se puede clasificar de acuerdo con el tipo y propiedades del material, la humedad, confinamiento lateral y otras características relacionadas con el estudio de amenazas, ya que pueden presentar mayor o menor riesgo y potencial destructivo.

2.2.5.1. Flujos secos

El término flujo genera la idea de presencia de agua, sin embargo, se han presentado flujos en materiales con bajo contenido de agua, se presentan en arenas, materiales granulares y materiales limosos.

2.2.5.2. Flujos de detritos

La mayoría de estos flujos presentan grandes velocidades y son capaces de producir afectaciones a personas, se pueden presentar en los volcanes, estos son denominados lahares.

2.2.5.3. Crecida de detritos

Se presenta a lo largo de un canal por la presencia de gran cantidad de detritos que son arrastrados por grandes crecidas de agua que generalmente son inusuales, como por ejemplo rotura de presas, liberación súbita de agua de lagos o glaciales.

2.2.5.4. Flujo de lodos

Se presenta en detritos plásticos saturados, muestra agua superficial durante el deslizamiento, sin embargo, el comportamiento se diferencia del deslizamiento por flujo debido al significativo contenido de agua.

2.2.5.5. Flujo de tierra

Generalmente se presenta en suelos arcillosos plásticos, se caracterizan por ser movimientos lentos a extremadamente lentos.

2.2.5.6. Deslizamiento por flujo

Se presenta en taludes de pendiente moderada y se relaciona con el exceso de presión de poros o licuación del material. Ocurren en cierto tipo de materiales como arenas, limos saturados no compactados o arcillas extra sensitivas

2.2.5.7. Avalancha de detritos

Comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos que al desplazarse presenta modificaciones internas que generan el flujo, morfológicamente son similares a las avalanchas de rocas.

2.2.5.8. Avalancha de rocas

Son flujos de roca fracturada, se presentan extremadamente rápidos y de gran longitud, usualmente presentan bloques de gran magnitud, alcanzando volúmenes considerables por lo que pueden ser de alta peligrosidad, aunque son poco frecuentes.

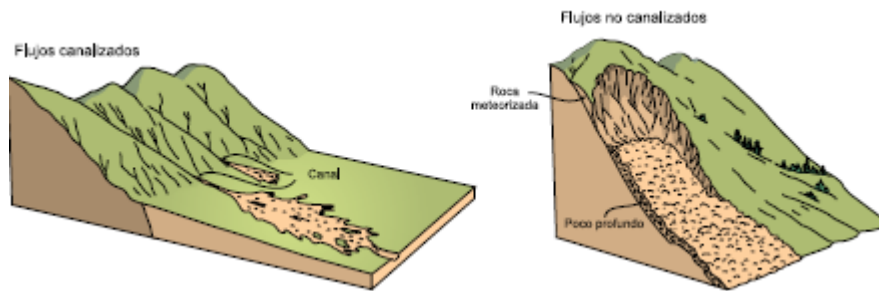


Figura 12: Esquema flujos (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

2.3. Estabilidad de taludes

La estabilidad es la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento, y que como primera medida es necesario definir los criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales el poder decir que en un instante dado cual será la inclinación apropiada en un corte o un terraplén, casi siempre la apropiada es la más escarpada que se sostenga sin caerse (De Matteis, 2003).

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material terreo a mover y por lo tanto diferentes costos, siendo así que el talud más tendido sería el conveniente, ya que funcionaría satisfactoriamente desde todos los puntos de vista a excepción del económico, de manera que las consideraciones de costo presiden la selección del talud idóneo, que resultará ser aquel que corresponda al menor volumen de movimiento de tierras (Rico Rodríguez & Del Castillo, 2006).

Los deslizamientos según la definición de (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes, 2013), son movimientos relativos de masas de suelo o roca con respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura cuando se supera la resistencia al corte de estas superficies. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes.

Alcántara Ayala (Alcántara Ayala, 2000) indica que la superficie de rotura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies de rotura semi-planas u onduladas a los movimientos traslacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos.

2.3.1. Factores que inciden en la estabilidad de los taludes en suelo

De acuerdo a Alfonso Rico y Hermelio Del Castillo, (Rico Rodríguez & Del Castillo, 2006), existen tres tipos de factores que indican en la estabilidad:

- a) Factores geomorfológicos.
 - Topografía de los alrededores y geometría de del talud.
 - Distribución de las discontinuidades y estratificaciones.

- b) Factores internos.
 - Propiedades mecánicas de los suelos constituyentes.
 - Estados de esfuerzos actuantes.
- c) Factores climáticos y, concretamente, el agua superficial y subterránea.

2.3.2. Causas de inestabilidad

Los procesos de remoción en masa ocurren en una ladera como resultado de la influencia de agente-s externos o internos, las causas externas producen un incremento en los esfuerzos, mientras que las causas internas disminuyen la resistencia de los materiales; en términos más sencillos un movimiento de masa de suelo se presenta cuando una porción de la ladera se vuelve muy débil para soportar su propio peso (Alcántara Ayala, 2000).

Entre los cambios externos se tienen las modificaciones geométricas por erosión, socavamiento, excavaciones, sobrecargas, así como las tensiones transitorias generadas por sismos, explosiones o maquinaria, y los cambios en el régimen hidrológico; mientras que los cambios internos se relacionan con la transformación de los materiales a través de movimientos progresivos por expansiones laterales, fisuras, procesos de intemperismo y erosión. En laderas se pueden presentar estos procesos por la presencia de uno o varios factores, sin embargo, ciertas circunstancias se pueden considerar desencadenantes como por ejemplo la presencia de lluvias extraordinarias en materiales permeables, en Tabla 1 se presentan el detalle de causas de los movimientos del terreno.

| Causas de índole geológica | Causas por procesos físicos |
|---|--|
| Materiales débiles Materiales sensibles Materiales intemperizados Materiales sujetos a cizallamiento Materiales con fisuras y diaclasas Discontinuidades estructurales Permeabilidad contrastante Contraste de materiales con diferente plasticidad | Precipitación intensa Derretimiento rápido de nieve o hielo Eventos precipitación extraordinarios Actividad sísmica Erupciones volcánicas Gelifracción Expansión e hidratación de arcillas |
| Causas morfológicas | Causas de origen antrópico |
| Levantamientos tectónicos o volcánicos Erosión glacial Erosión fluvial al pie de laderas Erosión marina al pie de acantilados Erosión glacial al pie de laderas Erosión en márgenes laterales Erosión subterránea Remoción de vegetación por incendios o sequías | Excavación de laderas o del pie de laderas Incremento de peso en laderas Disecación de cuerpos de agua Deforestación Irrigación Actividad minera Vibraciones artificiales |

Tabla 1: Detalle de causas de los movimientos del terreno (Cruden & Varnes, 1996).

2.3.3. Métodos de estabilización

El estudio de estabilidad de pendiente es un aspecto muy importante en la ingeniería geotécnica, casi todo proyecto de ingeniería tiene relación, en mayor o menor medida, con el análisis de estabilidad de las pendientes, ya sean naturales o artificiales, por ejemplo, la construcción de carreteras, túneles, presas, entre otros, requieren una investigación de la estabilidad de los suelos del área de influencia de los proyectos. El incremento de la actividad de los deslizamientos se puede atribuir a una falta de entendimiento de los procesos internos y externos que intervienen en estas inestabilidades, los deslizamientos de tierras pueden generar personas damnificadas y fatalidades, además de cuantiosas pérdidas materiales, el caso de la Josefina suscitado en el año 1993, en la provincia del Azuay, Ecuador, generó unas pérdidas estimadas de 147 millones de dólares (Bojorque, 2011), de ahí la importancia de un adecuado análisis y estabilización de pendientes.

Una vez identificada una inestabilidad en un talud, se pueden analizar distintos procesos o sistemas constructivos que permiten la estabilización del mismo, uno de los factores importantes a considerar es el costo de inversión que se requiere para esta actividad, sin embargo, varios factores pueden influir en el costo de construcción como son: tipo de suelo, accesibilidad, disponibilidad de equipos, altura del talud, entre otros. El proyectista tiene la difícil tarea de identificar la solución de estabilidad más conveniente, siendo el costo de construcción uno de los principales factores que pesarán al momento de definir la propuesta de intervención, la Revista de Ingeniería Geotécnica publicada por la FHWA, en su circular No 7, propone Soil Nailed Walls (Pantallas Ancladas) como una alternativa de estabilización y publica información referencial de los costos de construcción para distintas soluciones de estabilización.

En la Figura 13 se muestra que una de las soluciones de estabilización que presenta un amplio rango de costos es el soil nailing, por lo que se analiza como una de las alternativas de solución conjuntamente con la propuesta de reconfiguración del talud (terraceo).

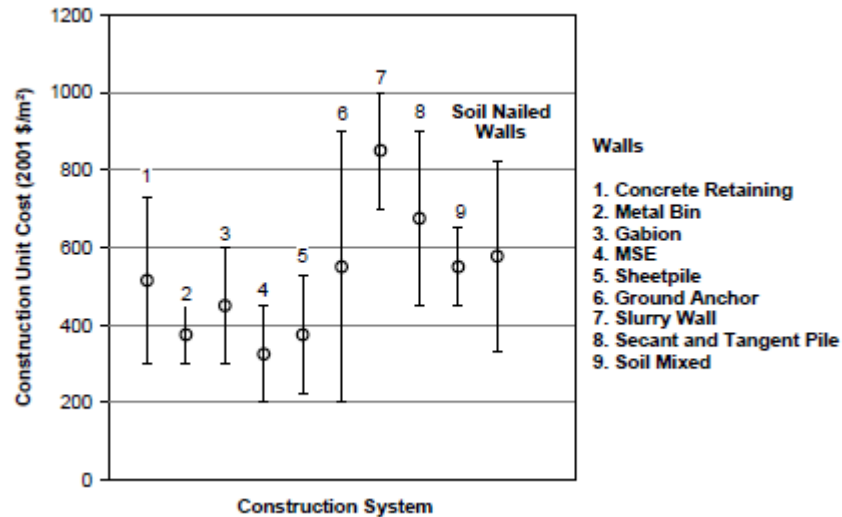


Figura 13: Comparación de costos de construcción para varios sistemas de estabilización (Carlos A. Lazarte, Victor Elias, R. David Espinoza, & Paul J. Sabatini, 2003).

2.3.3.1. Reconformación de talud (Terraceo)

Uno de los métodos de estabilización más utilizados es el terraceo, actividad que consiste en la conformación de terrazas que permiten reducir el peso y por ende las fuerzas que generan el movimiento del suelo, logrando de esta manera un equilibrio de masas. Entre las principales ventajas que tiene este proceso de estabilización es la facilidad de ejecución debido a que no se requieren materiales ni equipos especiales, además, facilita la implementación de métodos de control de erosión, mientras que las desventajas principales corresponden a la necesidad de grandes movimientos de tierras y las actividades relacionadas como son el transporte y disposición final del material retirado del talud.

2.3.3.2. Soil Nailing (Suelo claveteado)

El soil nailing o suelo claveteado consiste en una técnica de refuerzo del terreno que tiene su origen en la década de los sesentas con el Nuevo Método Austríaco de construcción de túneles, siendo utilizado actualmente para estabilización de taludes, terraplenes, túneles y estructuras de contención; con la utilización de barras de acero introducidas, la inyección de mortero fluido y un revestimiento de hormigón proyectado, permitieron soportar excavaciones de túneles en roca (Yepes, 2019).

2.3.3.2.1. Procedimiento de construcción

El soil nailing consiste en la introducción de anclajes de refuerzo pasivos que trabajan principalmente a tracción, las barras se colocan en sondeos previamente perforados y que luego son rellenados con mortero de inyección "grout", el diámetro de perforación oscila entre 50mm a 150mm, mientras que el diámetro de las barras de acero suele variar entre 25mm y 40mm. Las

perforaciones usualmente tienen una inclinación entre 10° a 20° y su separación suele estar entre 1.00m y 1.50m; la longitud del anclaje varía de acuerdo con las condiciones del terreno, aunque usualmente se encuentra entre 4m y 20m, oscilando entre 1.0 a 1.5 veces la altura del talud. (Yepes, 2019).

Como se muestra en la Figura 14, el procedimiento constructivo se puede resumir en 6 pasos: Paso 1: Excavación inicial, Paso 2: Perforación, Paso 3: Instalación del nail e inyección del grout, Paso 4: Colocación de la primera capa de hormigón lanzado, Paso 5: Construcción de los niveles subsiguientes; y, Paso 6: Colocación de la última capa de hormigón lanzado.

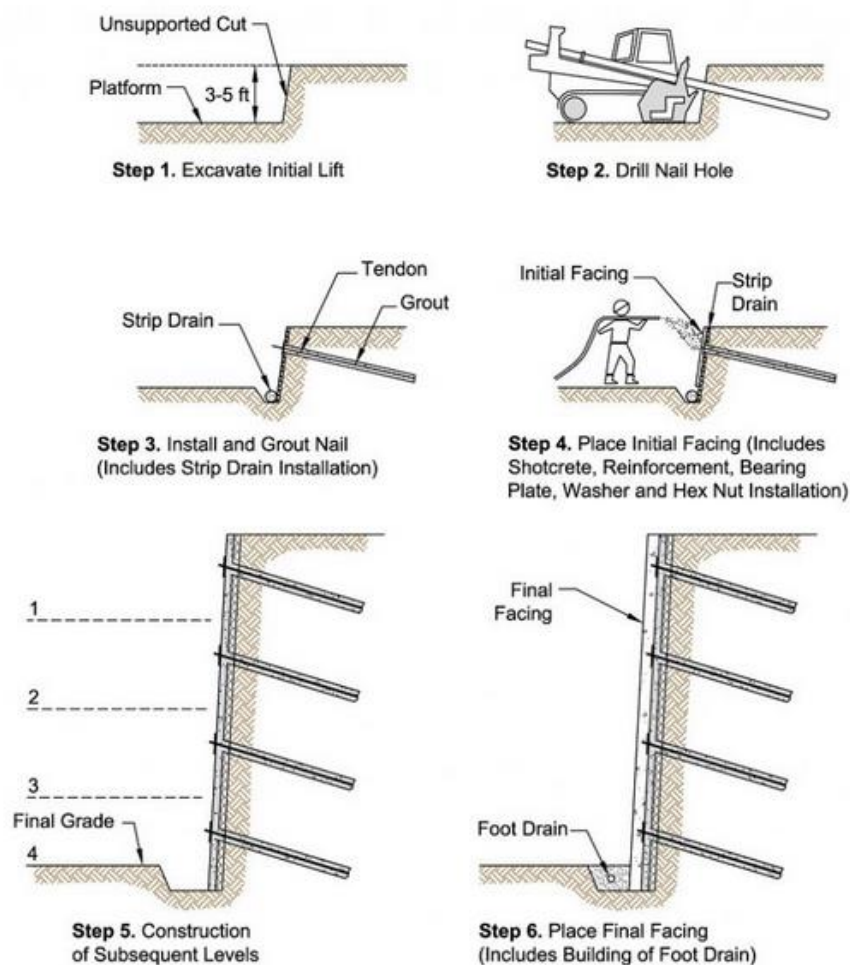


Figura 14: Procedimiento constructivo del Soil Nailing (Carlos A. Lazarte, Helen Robinson, Jesús E. Gómez, & Andrew Baxter, 2015).

2.3.3.2.2. Ventajas y desventajas de la técnica “soil nailing”

Vicente Capa (2021) en su análisis de la técnica de suelo claveteado, presenta ventajas y desventajas de esta metodología de estabilización, de donde se resaltan las siguientes (Capa Guachón, 2021):

Las ventajas se clasifican principalmente en tres categorías:

Construcción:

- El proceso constructivo es rápido, ocasiona menos impactos ambientales y requiere menor área de maniobra en relación a otras técnicas constructivas como pozos perforados o muros de pilotes que requieren equipos de mayor magnitud.
- La limitación de espacios no es inconveniente para la construcción.
- Las condiciones del terreno no son impedimento para la implementación, ya que fácilmente se puede ajustar la longitud, inclinación y ubicación del soil nailig.
- Los equipos utilizados son pequeños que facilitan su movilización e instalación, por lo que resulta más rentable en proyectos de difícil acceso.

Rendimiento:

- Funcionan de mejor manera en condiciones sísmicas debido a que son relativamente flexibles, su modo de falla es dúctil, por lo que presentan señales tempranas de advertencia ante posibles fallas.
- En proyectos viales, las deflexiones en muros claveteados se encuentran dentro de los límites tolerables, siempre y cuando la construcción se controle adecuadamente.

Costo:

- Tienden a ser más económicos que los muros de concreto convencionales o que los muros anclados, logrando ahorros entre un 10% a 30%.

Las desventajas más representativas se consideran:

- No es una solución óptima cuando se requiere un control estricto de deformaciones ya que puede ser necesario la implementación de reforzamiento adicional que ocasiona incremento del costo de construcción.
- La presencia de nivel freático dificulta la perforación e inyección del grout.
- No es adecuada su construcción en arenas y en general en suelos sin cohesión, ya que la perforación puede colapsar en el proceso constructivo.
- Presenta dificultades al momento de instalar clavos de gran longitud.
- Requiere la implementación de medidas preventivas para controlar la humedad y demás agentes corrosivos, lo puede generar costos adicionales en la implementación.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO TALUD 12 DE OCTUBRE

Para el desarrollo del proyecto se ha obtenido información geológica, geotécnica y topográfica facilitada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas la cual fuera generada durante la realización de los estudios “ESTUDIOS FACTIBILIDAD, IMPACTOS AMBIENTALES E INGENIERÍA DEFINITIVOS DE LA VÍA CUENCA – AZOGUES – BIBLIÁN (CAMINOSCA – PROMANVIAL)”; y, “ESTUDIOS DE PREFACTIBILIDAD, FACTIBILIDAD, IMPACTOS AMBIENTALES E INGENIERÍA DEFINITIVOS PARA LA

SOLUCIÓN DE LOS CONFLICTOS DE MOVILIDAD DE LA AUTOPISTA CUENCA – AZOGUES – BIBLIÁN, UBICADOS EN LAS PROVINCIAS DE AZUAY Y CAÑAR (UCUENCA EP)”, en base a dicha información se plantea como hipótesis la ampliación de la autopista Cuenca – Azogues – Biblián, en la zona del talud ubicado en el sector del redondel 12 de Octubre, se realiza el análisis de estabilidad del talud una vez ampliada la vía y se consideran dos opciones de diseño, terraceo y soil nailing, con la finalidad de comparar sus ventajas y desventajas.

3.1. Ubicación

El Redondel 12 de Octubre se encuentra emplazado en la Autopista Cuenca – Azogues – Biblián, en el cantón Cuenca perteneciente a la Provincia del Azuay, que se ubica en la zona sur del país. El talud en análisis se encuentra específicamente en las coordenadas UTM WGS84 Norte:9676872 Este:17719465 Cota: 2580 (ver Figura 15).



Figura 15: Ubicación talud 12 de Octubre, imagen Google Earth.

3.2. Geología

De acuerdo con los estudios desarrollados por el MTOP, el área del proyecto se encuentra dentro de la Formación Turi (PTu) y Depósitos Coluviales.

FORMACIÓN TURI

Litología: Consiste en sedimentos fluviales, donde dominan los conglomerados gruesos que se alternan o también pasan lateralmente a areniscas microconglomeráticas. En la parte alta se encuentran expuestos varios estratos de tobas blanquecinas de composición ácida. En los

conglomerados los cantos rodados son enteramente de rocas volcánicas andesíticas y dacíticas, la matriz omnipresente tanto en estas rocas como en las areniscas y limolitas es fuertemente tobácea, con relativa facilidad se pueden identificar fragmentos de pómez entre estos constituyentes.

La estratificación de los sedimentos Turi es bien marcada, predominan los estratos gruesos con espesores que superan los 2 m, en las areniscas es muy frecuente observar estratificaciones cruzadas lo que puede interpretarse, considerando también la presencia de conglomerados, que el ambiente de sedimentación fue continental y de alta energía; además, el fuerte aporte volcánico de los sedimentos indica una actividad volcánica no muy lejana (MTOPI, 2021).

Espesor y tectónica: a la Formación Turi se le atribuye un espesor de 200m, hace parte de la serie más joven de la cuenca sedimentaria de Cuenca, poco deformada, posterior a los depósitos más antiguos de la cuenca que sufrieron grandes deformaciones compresivas.” (Velez, 2012).

“Comportamiento geotécnico: es un macizo competente en taludes y cortes bajos, pero en fuertes pendientes propicia caída de bloques sin un buen sistema de drenaje y control del agua pueden generar deslizamientos traslacionales y rotacionales.” (MTOPI, 2021).

Los **Depósitos Coluviales (Qc)** son producto de procesos denudativos de la Formación Turi que formaron una serie de depósitos de pie de talud, en tiempos modernos estos se inestabilizaron generando procesos de movimientos en masa; los depósitos antiguos son compactos y estables, con susceptibilidad moderada a alta, aceptando pendientes naturales de entre 15° a 25°, mientras que los depósitos jóvenes son altamente susceptibles y potencialmente inestables sin un sistema de drenaje adecuado (MTOPI, 2021).

3.3. Clima

En Cuenca están presentes los climas: ecuatorial mesotérmico semihúmedo, ecuatorial de alta montaña, tropical megatérmico semihúmedo, tropical megatérmico húmedo, nival y tropical megatérmico seco; en la zona del proyecto se presenta el clima ecuatorial mesotérmico semihúmedo que se caracteriza por temperaturas irregulares, siendo las más altas entre los meses de marzo y septiembre mientras que las temperaturas más bajas se presentan entre junio y julio, la temperatura promedio anual fluctúan entre 18°C a 22°C y una precipitación anual de 500 mm (GADM Cuenca, 2015).

3.4. Sismicidad

Por la ubicación geográfica del cantón Cuenca, la actividad sísmica es menor, a diferencia de la zona norte a los 2° Latitud Sur (Palmira), la actividad sísmica es mayor, que paralelamente tiene una actividad volcánica, resultado del proceso subductivo. Cabe mencionar que alrededor del cantón Cuenca existe un sistema de fallas, provocando sismos superficiales de menor intensidad, por la

liberación energía. Los deslizamientos de tierra pueden generarse por los diferentes sistemas de fallas que tiene el cantón Cuenca tanto macro como micro regionales. En los últimos cuatro siglos y medio, la zona austral del país, ha soportado alrededor de 436 sismos, de los cuales, 255 fueron superficiales a magnitud 4 y mayores a magnitud 6 fueron 11. La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), se establece que el Cantón Cuenca se encuentra ubicada en la zona II y III, peligro “medio bajo” a “medio alto”. De acuerdo a la información de los estudios de Crecimiento Urbano en la Ciudad de Cuenca, de la consultora IDOM para BID y PRECUPA, referente al riesgo en la ciudad de Cuenca, se cuentan con registros una cantidad menor de sismos, con intensidades que variaban de 3.0 a 4.5, de 4.5 a 5.5 en casos puntuales, en los sectores este y oeste del Cantón Cuenca. PRECUPA establece que Cuenca se encuentra en la zona 5 a 2°30`Latitud Sur. La Sismicidad en esta parte del país se relaciona con la falla de Pallatanga, que se ubican en los diferentes puntos del país que va desde Riobamba, pasando por El Triunfo, Naranjal llegando a la parte sur del golfo de Guayaquil (GADM Cuenca, 2015)

Peligro sísmico: La Norma Ecuatoriana de Construcción establece una zonificación sísmica para el diseño sismo resistente, el cual se basa en el resultado de estudios de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno 475 años); la ciudad de Cuenca se encuentra catalogada como zona de amenaza sísmica alta (NEC, 2015).

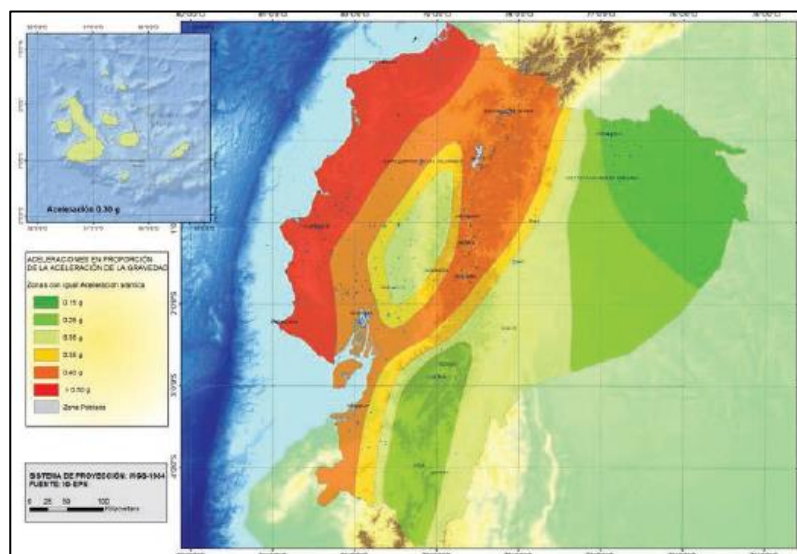


Figura 16: Zonas sísmicas para un período de retorno de 475 años. Fuente: (NEC, 2015).

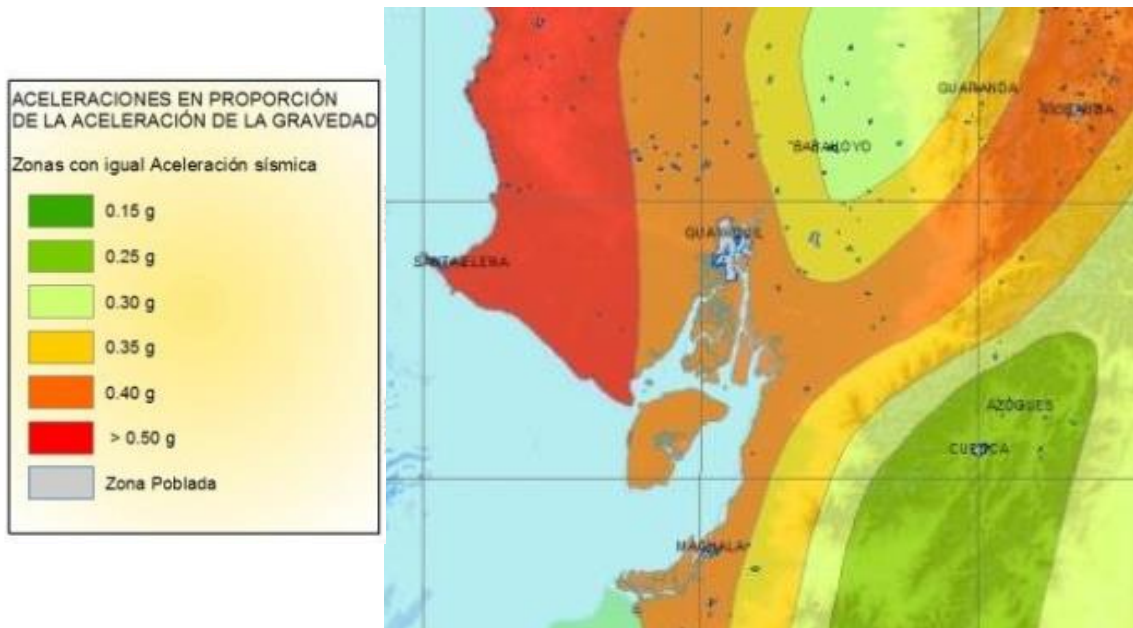


Figura 17: Aceleración sísmica para la ciudad de Cuenca, período de retorno de 475 años. Fuente: (NEC, 2015).

3.5. Estado actual de la infraestructura

La Autopista Cuenca – Azogues – Biblián forma parte de la Red Vial Estatal que se encuentra bajo responsabilidad del MTOP, esta carretera comunica a los cantones de Cuenca y Azogues, capitales de las provincias de Azuay y Cañar, respectivamente. La infraestructura vial está compuesta por seis carriles de circulación, tres en cada sentido; en la intersección con la Av. 12 de Octubre (Figura 18), de la ciudad de Cuenca, se encuentra un redondel, así como varios cortes que se han realizado para la construcción de la carretera aproximadamente hace treinta años.



Figura 18: Estado actual, talud redondel 12 de Octubre.

3.6. Proyecto de intervención

Con la hipótesis planteada de ampliación de la Autopista, se incorpora un carril adicional como se muestra en la Figura 19, en base de lo cual se desarrolla el análisis del costo de construcción que significará el movimiento de tierras y estabilización del talud intervenido luego de la ampliación de la carretera, para el efecto se analizará la estabilidad del talud en condiciones actuales, se proyectará la ampliación y se realizará el diseño de dos alternativas de estabilización del talud, para finalmente comparar los costos de construcción de cada alternativa.

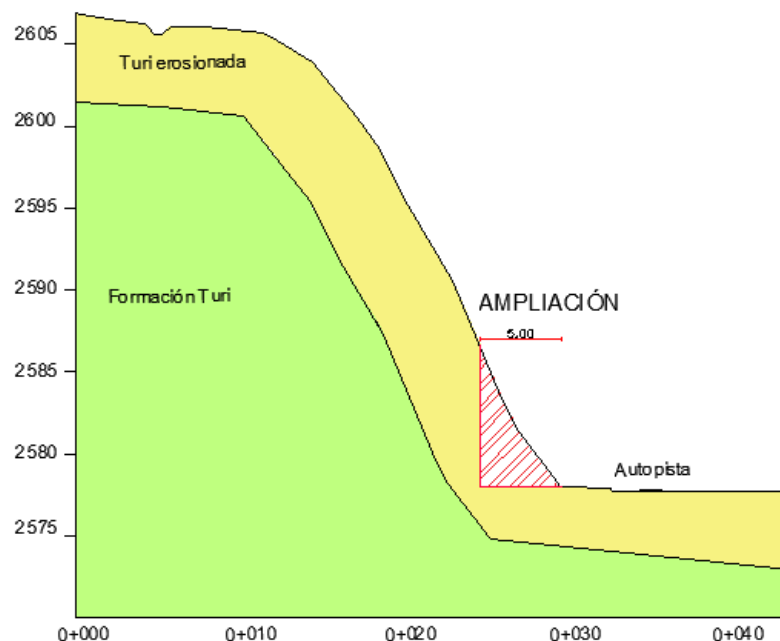


Figura 19: Propuesta de ampliación, Redondel 12 de Octubre.

3.7. Exploración Geotécnica

Uno de los métodos de exploración indirecta que permite obtener los parámetros del suelo corresponde a Sísmica de Refracción, en los estudios desarrollados por el MTOP se cuenta con información de estos ensayos, como resultados el Ministerio caracteriza tres capas de suelo presentes en la zona del Redondel 12 de Octubre, sin embargo, específicamente en el talud en análisis se encuentran únicamente las capas 1 y 3, en donde se presentan los siguientes resultados (Tabla 2):

| CAPA | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Potencia (m) |
|------|----------|----------|--------------|
| 1 | 520 | 352 | 8.00 - 10.3 |
| 3 | 1970 | 711 | - |

Tabla 2: Resultados de prospección geofísica, talud 12 de Octubre. Fuente: (MTOP, 2021).

Las muestras de suelo obtenidas en campo han sido sometidas a ensayos de laboratorio que permiten identificar los tipos de suelo presentes en la zona y se clasifican en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, un resumen se presenta en la Tabla 3.

| SITIO | PROFUNDIDAD D (m) | % GRAVA | % ARENA | % FINOS | % HUMEDAD | LL | LP | IP | CLASIFICACIÓN SUCS |
|---------------------|----------------------|---------|---------|---------|-----------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Calicata CD-3 | 0.50 – 2.00 | 0 | 61 | 39 | 15.51 | 45.48 | 23.32 | 22.16 | SC |
| Perforación PO-5 | 11.00 - 14.50 | 33 | 61 | 6 | 10.90 | NP | NP | NP | SW-SM |

Tabla 3: Resumen de resultados de ensayos de laboratorio, talud 12 de Octubre. Fuente: (MTO, 2021)

Grupo SC: El contenido de finos de este grupo es superior al 12%, los finos son de media a alta plasticidad y el índice de plasticidad es superior a 7.

Grupo SW: Estos suelos son bien graduados y con pocos finos, la presencia de finos no debe producir cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa ni en su capacidad de drenaje.

Grupo SM: En este grupo el contenido de finos afecta a las características de resistencia, esfuerzo-deformación y drenaje de la fracción gruesa, en la práctica esto ocurre para porcentajes superiores al 12%, la plasticidad de los finos de este grupo varía entre nula y media (Juarez & Rico, 2005).

3.8. Caracterización geomecánica de los suelos

Los parámetros geomecánicos de cada uno de los estratos permitirán determinar la estabilidad de los taludes tanto en condiciones actuales, así como a futuro luego de la implementación del proyecto, para el efecto se ha tomado en cuenta la información geotécnica disponible en los estudios desarrollados por el MTO, obtenidos en base a los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas encampo, de donde se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 4.

| ESTRATO | Vs | N ₆₀ | Descripción | Criterio | γ kN/m ³ | Cohesión (kN/m ²) | φ | Justificación |
|---------|-----|-----------------|--|------------|------------------------|----------------------------------|----|---|
| 1 | 352 | 32 | Formación Turi (Ptu) -SC (Arena arcillosa) | Friccional | 18.12 | 15.69 | 29 | Mediante la calicata se determinó una composición granulométrica de 0% de grava, 61% de arena y 39% finos (matriz areno-limosa) conjuntamente con 45.50 de límite líquido, por tal motivo se considera constante la cohesión y se calcula el ángulo de fricción dentro del análisis inverso. El valor del peso específico y la cohesión se obtuvo del ensayo de corte directo realizado a la muestra (CD-3). Para potencias de estratos y parámetros elásticos se empleó la línea LS-5. |

| | | | | | | | | |
|---|-----|------|---|------------|-------|---|----|---|
| 3 | 711 | > 50 | Formación Turi (Ptu) - SW-SM (Arenas bien graduadas – limo) | Friccional | 18.12 | 2 | 39 | Según el estudio geológico éste estrato forma parte de la Formación Turi, para la caracterización geomecánica de este estrato se emplea la muestra obtenida de la perforación PO-5 a una profundidad de 12.50 metros ya que las características de este material son similares a material del talud. Para potencias de estratos y parámetros elásticos se empleó la línea LS-5. En la perforación PO-6 se determinó la presencia del nivel piezómetro del agua. NF=3.75m (2571.95 msnm) |
|---|-----|------|---|------------|-------|---|----|---|

Tabla 4: Parámetros geomecánicos, talud 12 de Octubre. Fuente: (MTO, 2021).

Para obtener esta información el Ministerio desarrollo trabajos de campo como calicatas y perforaciones (ejemplo, Figura 22), que permitieron obtener muestras de suelos para realizar los ensayos de laboratorio que se detallan en el Anexo 1.



Figura 22: Perforación geotécnica sector 12 de Octubre, PO5 (MTO, 2021).

De acuerdo a los estudios realizados por el MTO, el nivel freático se encuentra a 3.75 m por debajo del pie del talud, por lo que no se considera su influencia para el análisis de estabilidad.

3.9. Análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales

El talud existente cuenta con un tratamiento de hormigón lanzado que evita la erosión por agentes ambientales como el viento y la lluvia, además cuenta con un sistema de anclajes. Los parámetros geomecánicos de cada uno de los estratos se han tomado de los estudios geotécnicos desarrollados por el MTO.

El análisis de estabilidad se desarrolla con la teoría de equilibrio límite, la cual se basa en comparar las fuerzas que inducen al movimiento con las fuerzas resistentes al mismo, a lo largo de una determinada superficie de falla, los análisis determinan el factor de seguridad referido al equilibrio entre las fuerzas que actúan; el método establece las siguientes hipótesis: el FS es constante en toda la superficie de falla, la resistencia a corte de los suelos satisface el criterio Mohr – Coulomb; y, al momento de la falla la resistencia al corte tiene magnitud constante a lo largo de toda la superficie de rotura. Para el análisis la masa de suelo que se encuentra sobre la superficie de rotura es dividida en franjas, a cada dovela se analiza su estabilidad, lo que permite determinar la seguridad global del talud (Sanhueza Plaza & Rodríguez Cifuentes, 2013). El método de Morgenstern & Price unifica el análisis de equilibrio de fuerzas y equilibrio de momentos en un solo método (Suarez-Burgoa, 2016).

En un análisis inicial de las condiciones actuales del talud se verifica que no cumple con las condiciones mínimas de estabilidad, ya que el factor de seguridad se muestra menor a 1, como se detalla en la Figura 23, para el efecto se ha utilizado el software SLOPE/W de GeoStudio, con la teoría de equilibrio límite utilizando el método Morgenstern & Price.

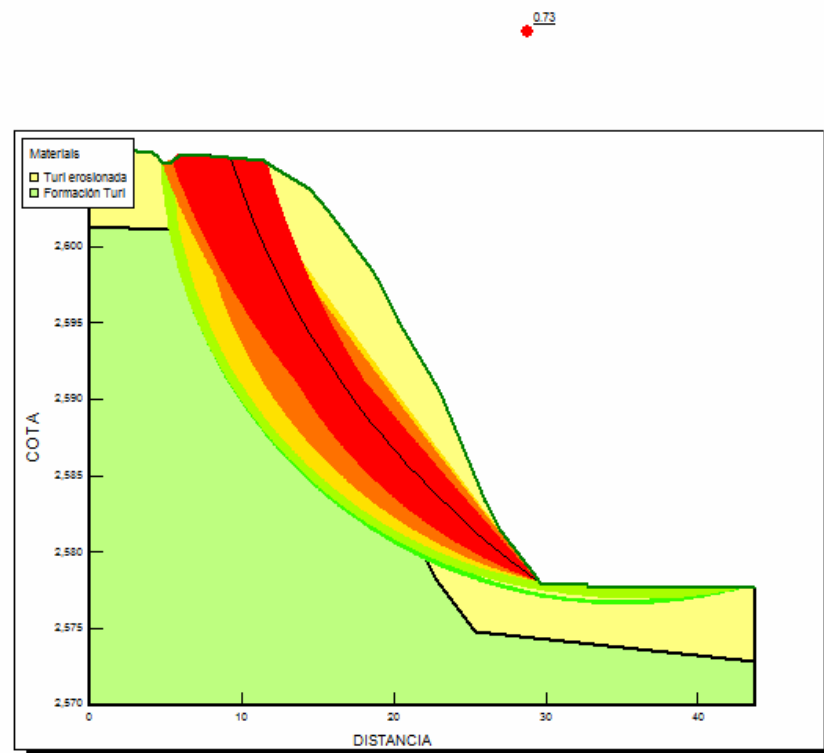


Figura 23: Estabilidad en condiciones actuales, talud 12 de Octubre.

Considerado que en estas condiciones el talud se encontraría inestable, se toma en cuenta para el análisis la presencia del sistema de anclaje, con lo que se determina que el talud se encuentra estable debido al aporte de los anclajes instalados, como se muestra en la Figura 24.

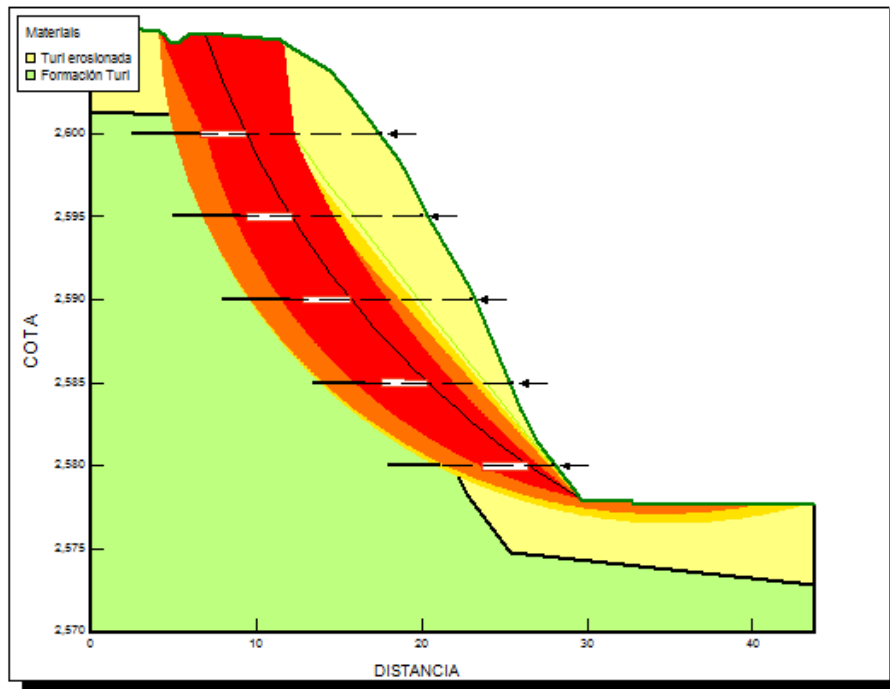


Figura 24: Estabilidad en condiciones actuales, talud 12 de Octubre.

Si bien se determina que la estabilidad del talud está dada por el aporte que genera el sistema de anclaje, se desconoce las características del mismo ya que dicha información pertenece al MTOP, por lo que no se desarrolla el análisis con aplicación de carga sísmica.

3.10. Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con terraceo.

Conforme se describió en el numeral 3.6 la propuesta de ampliación implica la necesidad de realizar un corte en el talud, por lo que se deberá realizar el movimiento de tierras a fin de conformar terrazas que garanticen la estabilidad del mismo. En condiciones estáticas el factor de seguridad mínimo debe ser de 1.5, de acuerdo a lo establecido en la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC, 2015), de igual manera en la misma norma se establece que el factor de seguridad mínimo debe ser de 1.05 cuando se considera la carga sísmica (pseudostática) dentro del análisis.

3.10.1. Análisis en condición estática.

Con la finalidad de determinar la sección óptima que permita cumplir con la normativa nacional, se han desarrollado varios análisis inclinando progresivamente el talud e implementado bermas intermedias, hasta finalmente obtener una geometría que cumpla con un FS mayor a 1.5, la cual se ha logrado con la implementación de dos bermas, la primera berma de 4m de ancho ubicada

a una altura de 7 m sobre el pie del talud, la segunda berma de 8m de ancho y a una altura de 7 m sobre la primera berma, finalmente se requiere un recorte de la parte alta del talud se conforma una plataforma a 10.2 m de altura sobre la segunda berma, conformándose el perfil del talud como se muestra en la Figura 25.

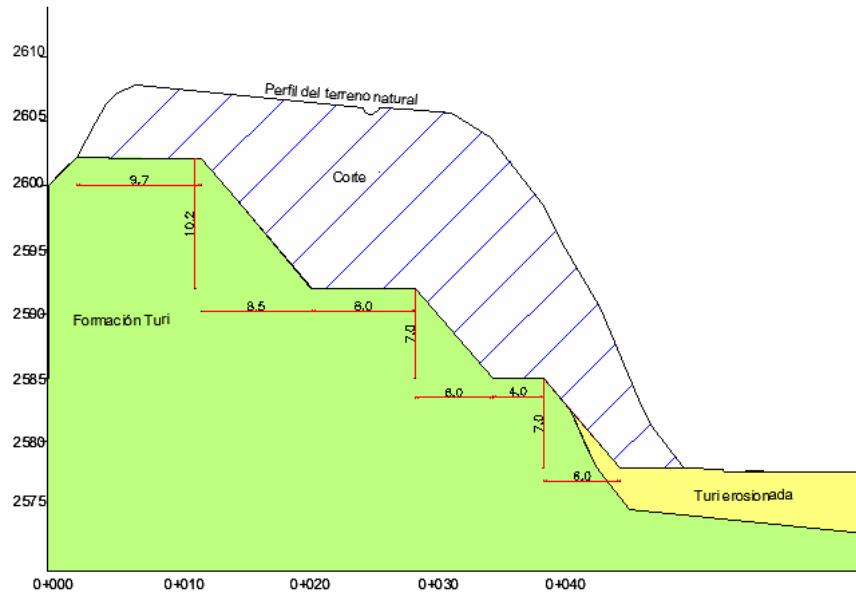


Figura 25: Sección del talud 12 de Octubre – Propuesta de terraceo

Con esta propuesta los taludes se conforman con una inclinación de 49.4° , es decir con una relación 1.17V:1H, logrando obtener un factor de seguridad superior al requerido en la normativa nacional, tal como se muestra en la Figura 26.

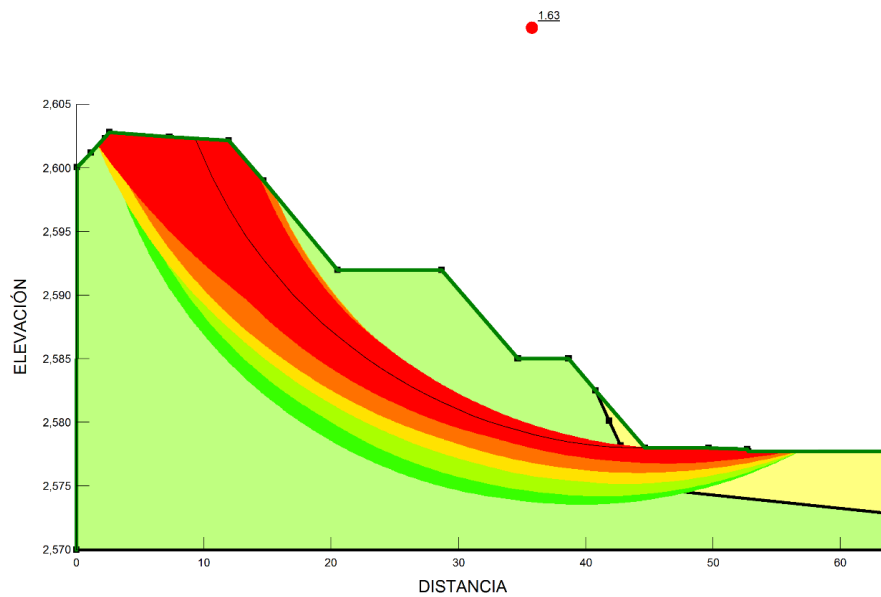


Figura 26: Análisis de estabilidad global (estático), talud 12 de Octubre.

Se resalta en rojo la zona de seguridad, es decir, la zona por donde se desarrollan la mayor cantidad de superficies de falla y con un menor factor de seguridad, aquí se encuentra también la superficie de falla crítica con FS=1.63, cumpliendo con lo establecido en la Norma Ecuatoriana de Construcción.

3.10.2. Análisis en condición pseudo estática.

Para desarrollar el análisis pseudo estático se considera la actuación de una carga sísmica, de conformidad con la normativa ecuatoriana (NEC, 2015) la demanda sísmica para el análisis pseudoestático será del 60% de la aceleración máxima en el terreno, obteniéndose de la siguiente expresión:

$$k_h = \frac{0.6(z * Fa)}{g}$$

Los valores de z y Fa se encuentran en la NEC y se establecen de acuerdo al tipo de suelo y zona sísmica del proyecto, con lo cual se obtiene el coeficiente sísmico horizontal requerido para el análisis, como se describe a continuación:

Para obtener el valor del factor Z se selecciona la zona sísmica de acuerdo al mapa de peligro sísmico presentado en el numeral 3.4 Sismicidad, de dicho mapa se obtiene que para la ciudad de Cuenca le corresponde una zona con aceleración sísmica de 0.25 g, correspondiente a la Zona sísmica II, con una caracterización de peligro sísmico Alta y un valor de Z = 0.25, como se muestra en la Tabla 5Tabla 1.

| Zona sísmica | I | II | III | IV | V | VI |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|------|----------|
| Valor factor Z | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | ≥ 0.50 |
| Caracterización del peligro sísmico | Intermedia | Alta | Alta | Alta | Alta | Muy alta |

Tabla 5: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada, (NEC, 2015).

El factor de sitio (Fa) se encuentra en función del tipo de suelo, en el caso del talud 12 de Octubre, de acuerdo a la Tabla 6, corresponde a un suelo tipo C, ya que, como se describió en el numeral 3.7 Exploración Geotécnica, en este sitio se tiene un valor de Vs=711m/s.

| Tipo de perfil | Descripción | Definición |
|----------------|---|---|
| A | Perfil de roca competente | $V_s \geq 1500$ m/s |
| B | Perfil de roca de rigidez media | $1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760$ m/s |
| C | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios | $760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ m/s $N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa |
| D | Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180$ m/s |
| | Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones | $50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50$ kPa |

Tabla 6: Clasificación de los perfiles de suelo (NEC, 2015).

Considerando el tipo de suelo y el factor Z establecidos, se determina un factor de sitio $F_a=1.3$, de conformidad con lo establecido en la Tabla 7.

| Tipo de perfil del subsuelo | Zona sísmica y factor Z | | | | | |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|------------|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | ≥ 0.5 |
| A | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 1.4 | 1.3 | 1.25 | 1.23 | 1.2 | 1.18 |
| D | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.25 | 1.2 | 1.12 |
| E | 1.8 | 1.4 | 1.25 | 1.1 | 1.0 | 0.85 |
| F | Véase Tabla 2 : Clasificación de los perfiles de suelo y la sección 10.5.4 | | | | | |

Tabla 7: Tipo de suelo y Factores de sitio F_a (NEC, 2015).

Finalmente se determina el coeficiente de carga sísmica horizontal.

$$k_h = 0.6 * Z * F_a$$

$$k_h = 0.6 * 0.25 * 1.3$$

$$k_h = 0.19$$

Aplicando esta demanda sísmica se verifica que el talud cumple con la normativa nacional al presentar un $FS=1.17$, tal como se muestra en la en el análisis que se presenta en la Figura 27: Análisis pseudo estático, terraceo talud 12 de Octubre.

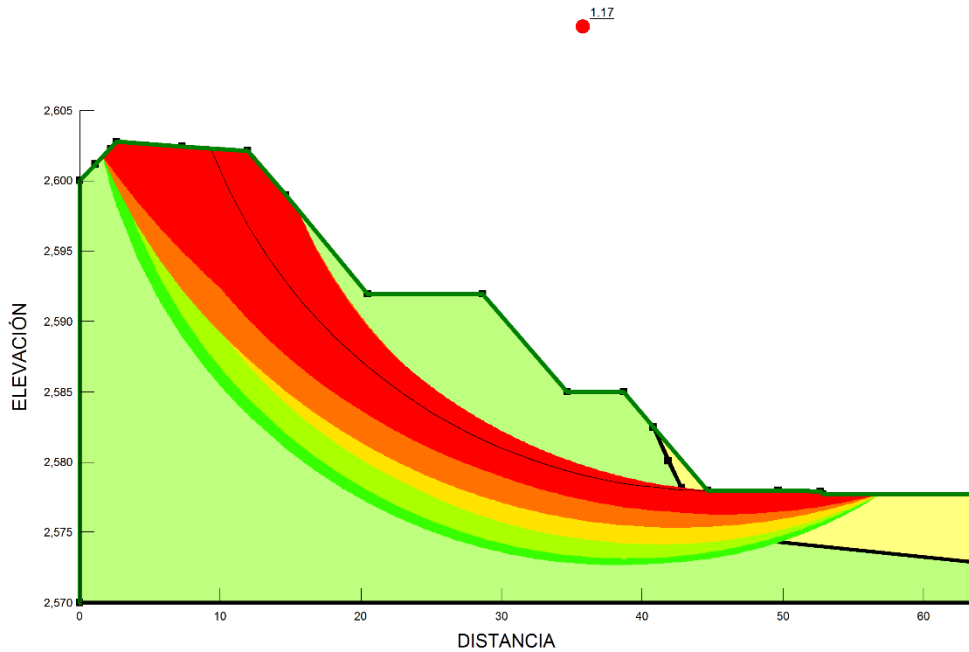


Figura 27: Análisis pseudo estático, terraceo talud 12 de Octubre.

La zona de seguridad mantiene la misma tendencia que en el análisis estático, por lo que se garantiza la estabilidad del talud, además a fin de evitar la erosión en los taludes se considera la implementación de hormigón lanzado, el mismo que no tendrá un aporte a la estabilidad, sino únicamente la función de control de erosión.

3.11. Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con soil nailing

Se considera la misma hipótesis del proyecto, es decir la ampliación de la vía en cinco metros; para el diseño preliminar de los elementos requeridos de soil nailing se ha tomado las recomendaciones de la Federal Highway Administration – FHWA de los Estados Unidos de Norte América en su Manual Técnico “Soil Nail Walls” (Lazarte et al, 2003). Para configurar el talud con la ampliación se propone un corte con pendiente similar al talud existente, como se muestra en la Figura 28: Geometría del talud propuesto – Soil nail

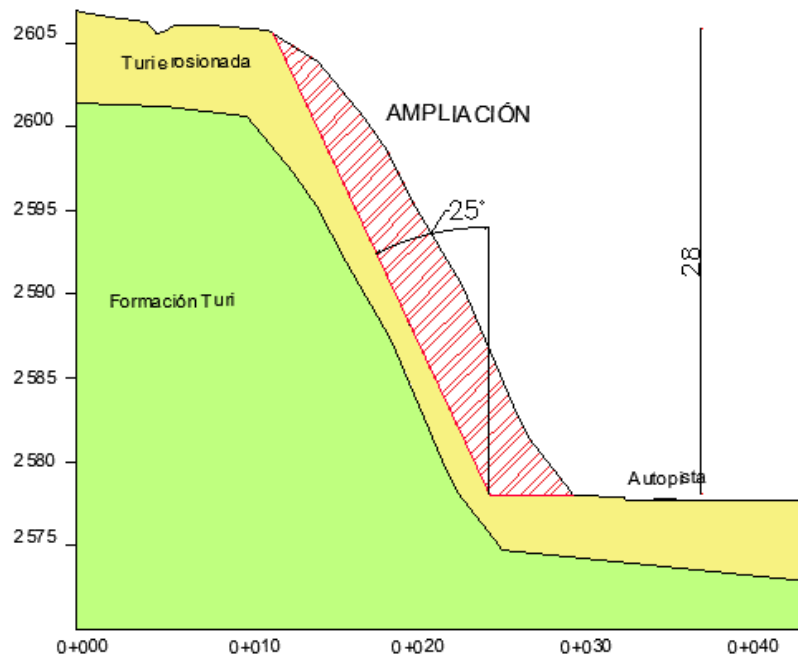


Figura 28: Geometría del talud propuesto – Soil nailing, talud 12 de Octubre.

3.11.1. Prediseño.

Se deben establecer condiciones iniciales de la propuesta, el área de aporte de un nail (clavo) es de aproximadamente 4 m², por lo que la separación horizontal y vertical podría ser desde 1m hasta 2 m; la FHWA recomienda un diámetro de perforación desde 100 mm hasta 200 mm; tomando en cuenta que la mayor parte del sistema de refuerzo se encontrará en la Formación Turi se asumirá la información de este suelo para los parámetros de diseño, además se parte con una separación de 1m tanto horizontal como vertical y el diámetro de perforación de 100 mm.

La **capacidad al arrancamiento normalizada** está definida por la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{q_u D_{DH}}{FS_p \gamma S_H S_V}$$

En donde:

q_u = capacidad de arrancamiento

D_{DH} = diámetro de perforación

FS_p = Factor de seguridad arrancamiento

γ = peso específico del suelo

S_H = separación horizontal

S_V = separación vertical

Como datos iniciales para el prediseño se ha tomado:

$D_{DH} = 100\text{mm}$

$FS_p = 2$ (Lazarte et al, 2003)

$\gamma = 18.12 \text{ kN/m}^3$

$S_H = 1\text{m}$

$S_V = 1\text{m}$

La resistencia al arrancamiento se encuentra en función del tipo de suelo, en el caso de la Formación Turi corresponde a una Arena limosa bien graduada SW-SM, para este tipo de suelo, considerando la Tabla 8, este valor puede variar entre 55kPa a 90kPa, por lo que se toma un valor de 60 kPa.

| Material | Construction Method | Soil/Rock Type | Ultimate Bond Strength, τ_u (kPa) |
|--------------------|-----------------------|---------------------|--|
| Rock | Rotary Drilled | Marl/limestone | 300–400 |
| | | Phyllite | 100–300 |
| | | Chalk | 500–600 |
| | | Soft dolomite | 400–600 |
| | | Fissured dolomite | 600–1000 |
| | | Weathered sandstone | 200–300 |
| | | Weathered shale | 100–150 |
| | | Weathered schist | 100–175 |
| | | Basalt | 500–600 |
| | | Slate/Hard shale | 300–400 |
| Cohesionless soils | Rotary drilled | Sand/gravel | 100–180 |
| | | Silty sand | 100–150 |
| | | Silt | 60–75 |
| | | Piedmont residual | 40–120 |
| | | Fine colluvium | 75–150 |
| | Driven casing | Sand/gravel | |
| | | Low overburden | 190–240 |
| | | High overburden | 280–430 |
| | | Dense moraine | 380–480 |
| | | Colluvium | 100–180 |
| | Augered | Silty sand fill | 20–40 |
| | | Silty fine sand | 55–90 |
| | | Silty clayey sand | 60–140 |
| Jet grouted | Sand | 380 | |
| | Sand/gravel | 700 | |
| Fine-Grained Soils | Rotary drilled | Silty clay | 35–50 |
| | Driven casing | Clayey silt | 90–140 |
| | | Loess | 25–75 |
| | Augered | Soft clay | 20–30 |
| | | Stiff clay | 40–60 |
| | | Stiff clayey silt | 40–100 |
| | Calcareous sandy clay | 90–140 | |

Tabla 8: Resistencia al arrancamiento para Soil Nail en suelo y roca. (Elias & Juran, 1991).

Obteniendo como resultado:

$$\mu = 0.17$$

La **cohesión normalizada** se determina con la siguiente expresión:

$$c^* = \frac{c}{\gamma H}$$

En donde:

c = cohesión

γ = peso específico del suelo

H = altura del muro

En este caso el suelo tiene una cohesión de 2kPa, por lo que la cohesión normalizada no es considerada para el cálculo (0.004).

Con esta información se obtiene la relación L/H y la tensión máxima del nail considerando el ábaco de la Figura 29, ingresando con el valor de $\mu=0.17$ y utilizando la curva correspondiente al ángulo de fricción $\phi=39^\circ$.

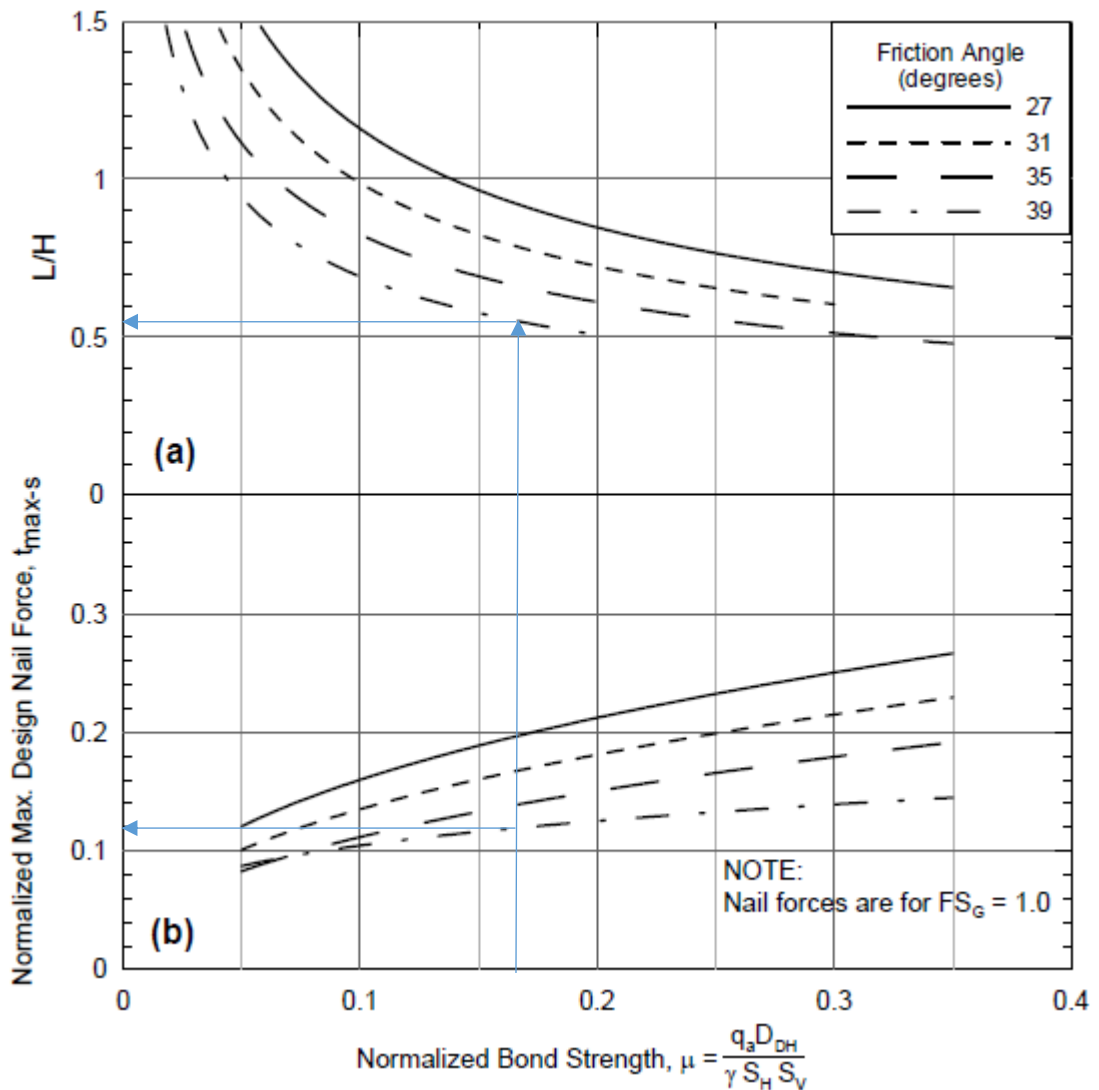


Figura 29: L/H y t_{max-s} para un talud de 10° (Lazarte et al, 2003).

Obteniendo como resultado:

$$\frac{L}{H} = 0.55$$

$$t_{max-s} = 0.12$$

El ábaco fue generado para un talud en condiciones específicas, como se muestra en la Figura 30; considerando que el talud en análisis posee características diferentes, es necesario realizar correcciones por el diámetro del sondeo, por la cohesión y por el factor de seguridad.

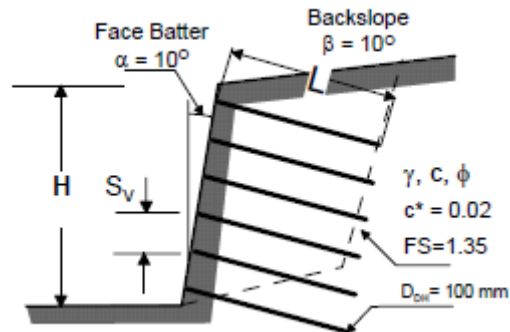


Figura 30: Geometría del talud para generar el ábaco (Lazarte et al, 2003).

Aplicando las correcciones se obtienen nuevos valores de relación L/H, así como de t_{max} , para lo que se procede de la siguiente manera:

Corrección de la longitud:

$$\frac{L}{H} \text{ corregido} = \frac{L}{H} * C_{1L} * C_{2L} * C_{3L}$$

En donde:

C_{1L} = Corrección por el diámetro del sondeo, Figura 31.

$C_{2L} = -4.0 c^* + 1.09 \geq 0.85$ Corrección por la cohesión.

$C_{3L} = 0.52 FS + 0.30 \geq 1.0$ Corrección por el Factor de Seguridad Global FS_6 .

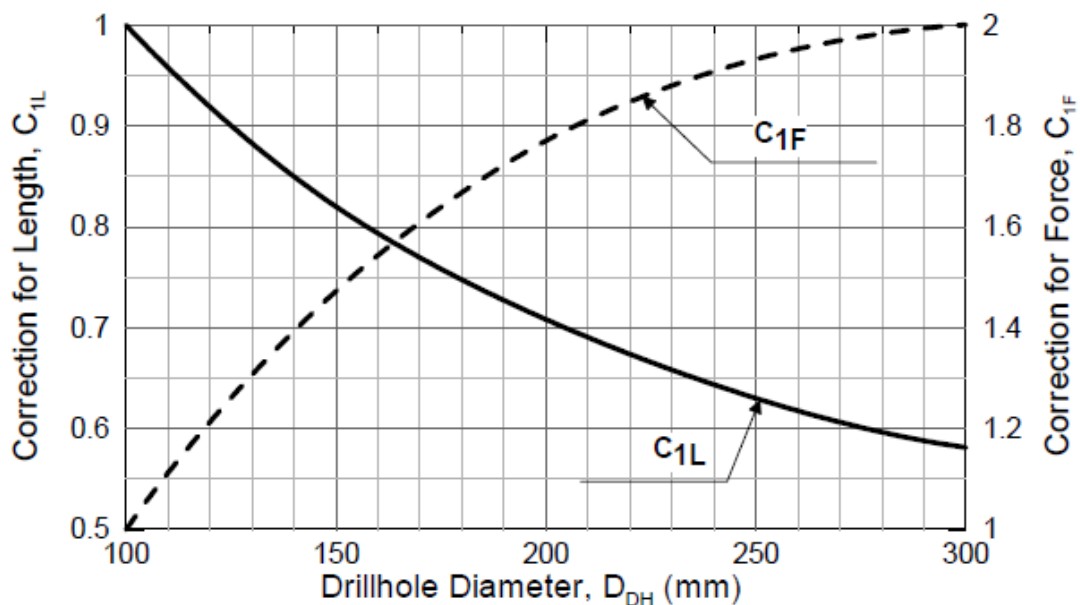


Figura 31: Factores para corrección por el diámetro de perforación (Lazarte et al, 2003).

Para este caso:

$C_{1L} = 1.0$ Obtenido del ábaco de la Figura 30, en este caso corresponde a un valor de 1 ya que el diámetro de perforación es de 100mm.

$C_{2L} = 1.09$ Debido a que la cohesión tiene un valor de 2kPa, no se consideró la cohesión normalizada.

$C_{3L} = 1.08$ Considerando un FS=1.5.

Con lo que se obtiene un nuevo valor:

$$\frac{L}{H} \text{ corregido} = 0.65$$

Corrección de la tensión:

$$t_{max} \text{ corregido} = t_{max} * C_{1F} * C_{2F}$$

En donde:

C_{1F} = Corrección por el diámetro del sondeo, Figura 31.

$C_{2F} = -4.0 c^* + 1.09 \geq 0.85$ Corrección por la cohesión.

Los valores de C_{1F} y C_{2F} se obtienen con las mismas consideraciones descritas para las correcciones por longitud, con los siguientes resultados:

$C_{1F} = 1.0$

$C_{2F} = 1.09$

$$t_{max} \text{ corregido} = 0.13$$

Finalmente se determina la nueva longitud mínima y carga máxima del nail:

Longitud del perno:

$$L = 0.65 * H$$

$$L = 18.20 \text{ m}$$

Carga máxima de diseño para el perno:

$$T_{max-s} = t_{max-s} \gamma H S_H S_V$$

$$T_{max-s} = 66.36 \text{ kN}$$

La **sección del acero** necesaria para resistir esta carga corresponde a una varilla de $D=19$ mm, considerando un factor de seguridad a la tracción $FSt=1.8$, con un acero de 420 MPa, calculando la sección de acero necesaria con la siguiente fórmula:

$$Anb = \frac{FS_t T_{max-s}}{fy}$$

$$Anb = 284 \text{ mm}^2$$

3.11.2. Diseño final

En el diseño definitivo se verifica que la solución establecida en el prediseño cumpla satisfactoriamente con las condiciones de estabilidad del talud y se realizan las modificaciones correspondientes en caso de ser necesarias para cumplir con los factores de seguridad establecidos en la NEC.

3.11.2.1. Estabilidad global, análisis en condición estática

El análisis de estabilidad global se desarrolla en el software GeoStudio, considerando la instalación de clavos de acero de 19mm de diámetro y con una separación de 1m tanto horizontal como vertical, su longitud es variable ya que se conforma de 2 elementos de 9m, 3 de 12m, 5 de 15m y 19 de 18m; con lo cual se obtiene un factor de seguridad superior a 1.5 como se muestran en la Figura 32.

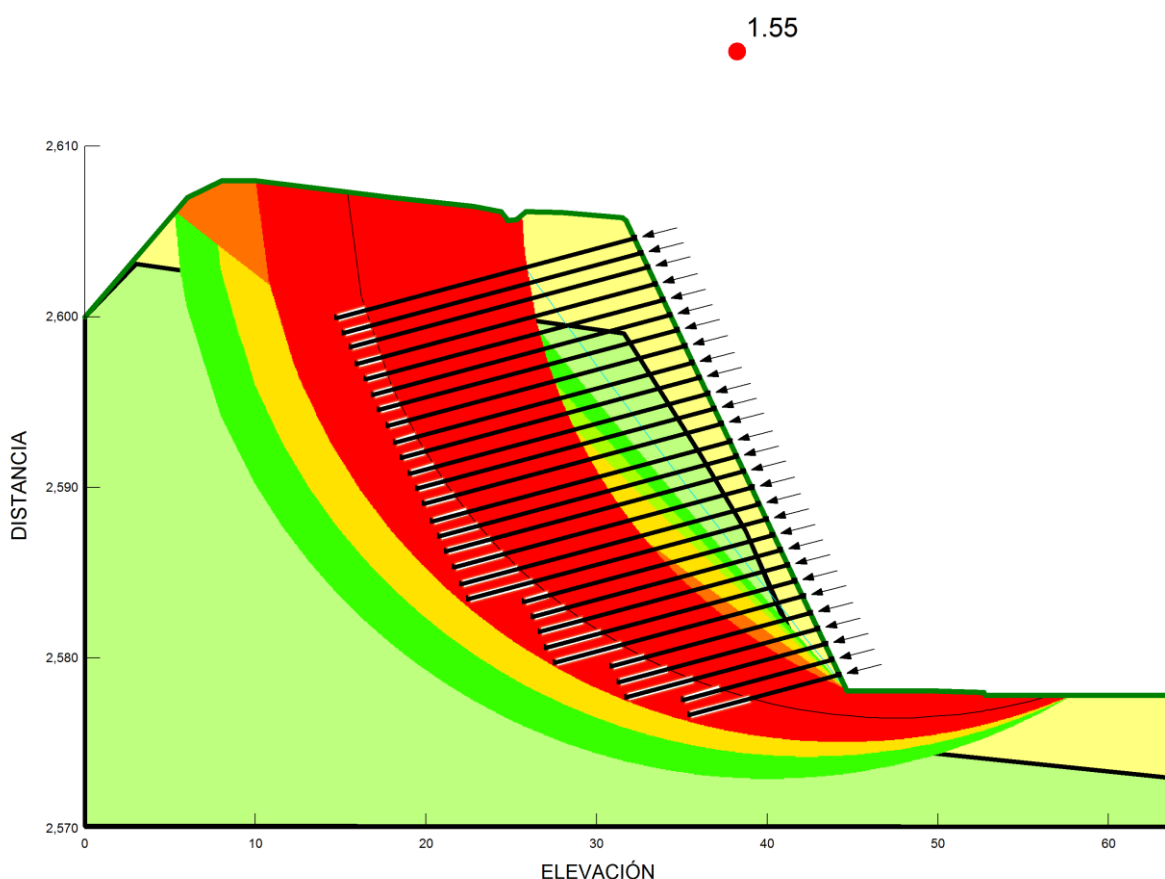


Figura 32: Estabilidad global – soil nail – análisis estático.

Se observa también que los clavos cubren la mayor parte de la zona crítica y estos son capaces de resistir los esfuerzos generados en las probables superficies de falla más críticas, superando en todos los casos el mínimo factor de seguridad establecido en la normativa.

3.11.2.2. Estabilidad global, análisis en condición pseudo estática

El análisis se realiza tomando las mismas consideraciones que para el caso de terraceo, es decir los valores de Z y F_a son los mismos ya que corresponde al mismo suelo en estudio; los resultados se muestran en la Figura 33.

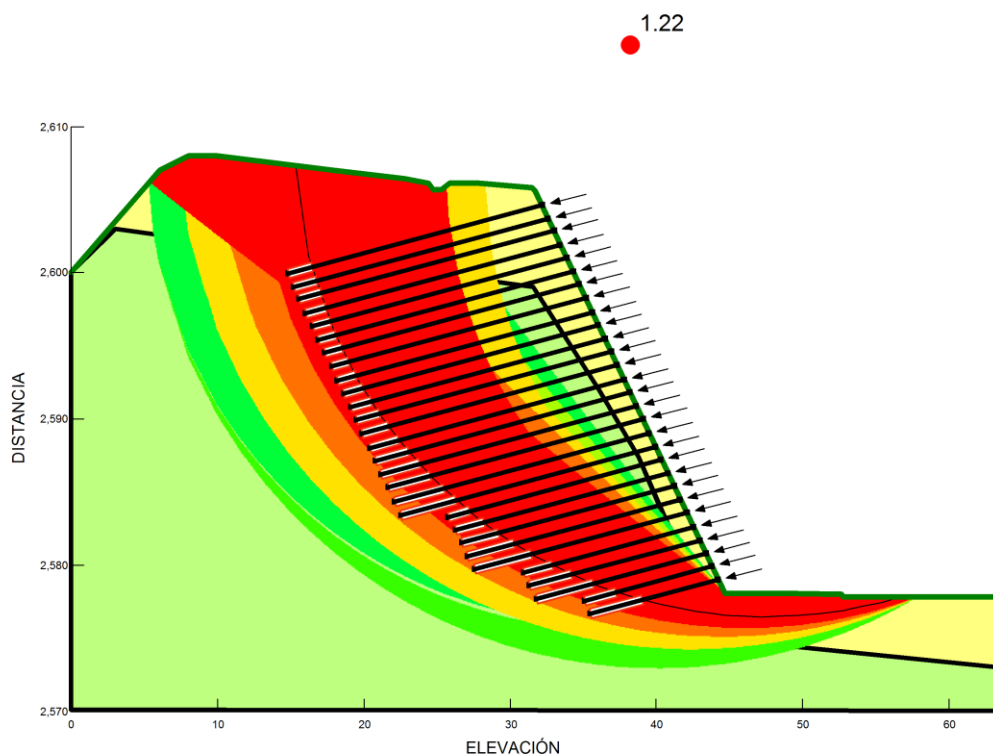


Figura 33: Estabilidad global – soil nail – análisis pseudo estático

Se puede notar que se supera el mínimo FS que la NEC establece en 1.05, al presentar un valor de 1.22, además, la zona crítica es cubierta en su mayor parte, por lo que se considera que el diseño del sistema de reforzamiento del talud es adecuado.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO TALUD SECTOR IESS

4.1. Ubicación

El talud en estudio se encuentra ubicado en la intersección de la Autopista Cuenca – Azogues – Biblián E35, con la vía Monay - Baguanchi, cantón Cuenca, Provincia del Azuay, coordenadas UTM WGS 84 Norte: 9679242, Este: 725521E.

En concordancia con la información proporcionada por la Subsecretaría Zonal 6 del MTOP, el diseño geométrico en el sitio de estudio para la implementación de un carril adicional de circulación se ha planificado al lado derecho, en dirección Cuenca – Azogues, es decir, en la lateral sur de la Autopista, como se muestra en la Figura 34.



Figura 34: Ubicación talud IESS, imagen Google Earth.

4.2. Geología

La zona en estudio se ubica en su mayor parte sobre amplias terrazas de río y hacia el norte de la Formación Mangan y sobre estas las terrazas antiguas de diferentes niveles.

FORMACIÓN MANGAN

Litología: Secuencia de limonitas, lutitas y areniscas fonogranulares, es su parte inferior de color claro: en zona superior arenisca fabácea gruesa café, que se hace conglomerado hacia arriba.

Comportamiento geotécnico: En la formación Mangan, predominan estratos fósiles, mismas que reducen la resistencia al corte hasta la falla, en condiciones saturadas, las cuales se encuentran limitadas por estratos competentes.

TERRAZAS ALUVIALES

Depósitos en su gran mayoría de origen aluvial, que en la zona de estudio cubren grandes áreas planas con diferentes niveles de terrazas (Qt1-5) compuestas por potentes capas de conglomerado de matriz areno-arcillosa, distribuidas en las márgenes del río Tomebamba.

Las terrazas (Qt1-Qt2) se encuentran formadas por bloques y boleos subangulares a redondeadas y subesféricos en matriz areno arcillosa.

Comportamiento geotécnico: Depósitos susceptibles a desprendimiento si se forman taludes, competentes, permeables, mismos que predominan fraccionamientos, y estos son aptos para la construcción y construcción de cimentaciones.

A los 29° las pendientes naturales son estables, en ciertos casos se pueden tener cortes relativamente verticales con alturas de hasta 25 metros, estos pueden ocasionar desprendimientos

Como se mencionó, las terrazas tienen inestabilidad hacia los taludes de borde, al momento de construir un talud, se deben realizar cortes adecuados, bermas, control de agua superficial con

cunetas, colocación de vegetación nativa, muros de sostenimiento de ser el caso y delimitar zonas de seguridad (MTO, 2021).

4.3. Clima

La condición climática del sector es similar al descrito para el Redondel 12 de Octubre, además se encuentra cercana la quebrada de Baguanchi y el río Tomebamba.

4.4. Estado actual de la infraestructura

El Redondel IESS forma parte de la vía Cuenca – Azogues – Biblián E35, misma que es administrada por Ministerio de Transporte y Obras Públicas, esta vía conecta diferentes cantones, entre los más importantes Cuenca y Azogues, en el tramo desde el Salado hasta El Descanso, la infraestructura vial comprende seis carriles de circulación, tres en cada sentido; en la intersección de esta vía con la vía Monay Baguanchi, se encuentra el redondel mencionado, para su construcción fue necesario realizar varios cortes en el terreno.



Figura 35: Autopista Cuenca – Azogues – Biblián, sector del redondel IESS.

4.5. Proyecto de intervención

La hipótesis planteada de ampliación para la construcción de un carril adicional, genera un corte de 5m en el pie del talud, como se muestra en la Figura 36, por lo que es necesario analizar la estabilidad del talud luego de la intervención.

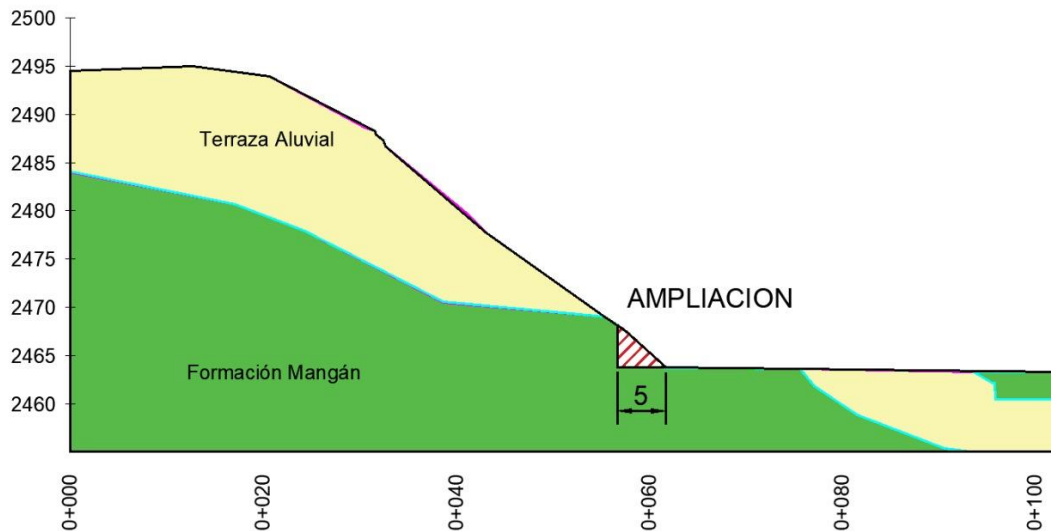


Figura 36: Propuesta de ampliación, Redondel IESS.

4.6. Exploración Geotécnica

Uno de los métodos de exploración indirecta que permite obtener los parámetros del suelo corresponde a Sísmica de Refracción, en los estudios desarrollados por el MTOP se cuenta con información de esta actividad desarrollada en la zona del proyecto, información que corresponde a los siguientes resultados (Tabla 9):

| CAPA | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Potencia (m) |
|------|----------|----------|--------------|
| 1 | 237 | 163 | 2.80 – 5.70 |
| 2 | 1623 | 816 | - |

Tabla 9: Resultados de prospección geofísica, talud IESS. Fuente: (MTOP, 2021).

La caracterización geomecánica se obtiene de la campaña de exploración geotécnica realizada en el sitio por el MTOP, en la zona de estudio se cuenta con información correspondiente a una perforación (PM3) y una calicata (CD2), la perforación se realizó cerca al pie del talud, mientras la calicata en la parte alta del mismo, como se presenta en la Figura 37 y Figura 38.



Figura 37: Plano de campaña de exploración geotécnica (MTO, 2021).

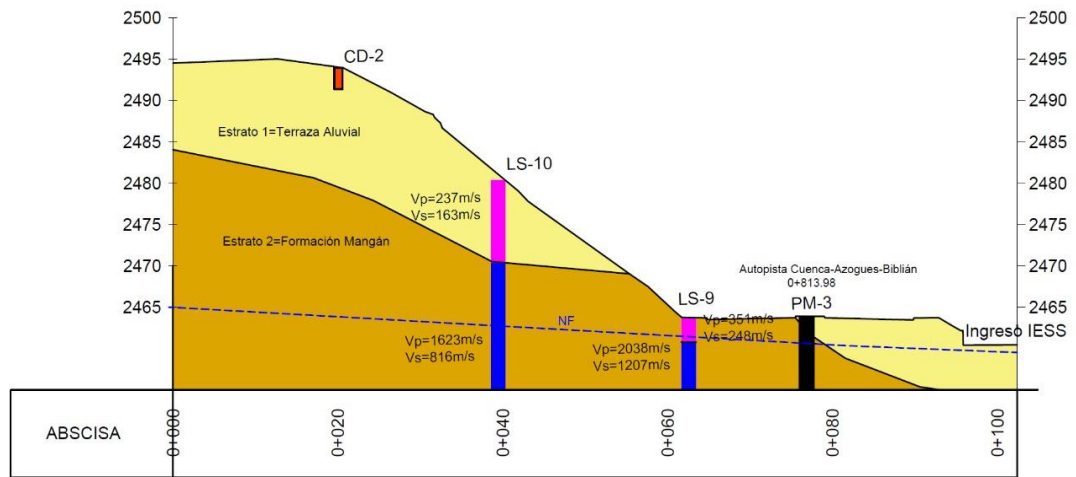


Figura 38: Perfil de exploración geotécnica, talud IESS (MTO, 2021).

La caracterización geomecánica obtenida como resultado de la campaña de exploración geotécnica realizada en campo y laboratorio por el MTO muestra los siguientes resultados (Tabla 10):

| SITIO | PROFUNDIDAD (m) | % GRAVA | % ARENA | % FINOS | % HUMEDAD | LL | LP | IP | CLASIFICACIÓN SUCS |
|------------------|-----------------|---------|---------|---------|-----------|-------|-------|-------|--------------------|
| Calicata CD-2 | 0.50 – 2.00 | 49 | 41 | 10 | 13.05 | 36.69 | 23.51 | 13.18 | GP-GC |
| Perforación PM-3 | 0.00 – 5.00 | 4 | 33 | 63 | 21.86 | 66.27 | 31.40 | 34.87 | CH |

Tabla 10: Resumen de resultados de ensayos de laboratorio. Fuente: (MTO, 2021).

Alfonso Rico y Eulalio Juarez (2005) en su publicación de Fundamentos de la Mecánica de Suelos (Juarez & Rico, 2005), presentan las principales características de estos tipos de suelos como:

Grupo GP: Son suelos mal graduados, el contenido de finos de este grupo no es superior al 5%, dentro de este grupo están comprendidas las gravas y arenas uniformes tales como las que se depositan en los lechos de ríos y playas, y las mezclas de gravas y arenas finas provenientes de excavaciones e diferentes estratos.

Grupo GC: El contenido de finos de este grupo es superior al 12%, los finos son de media a alta plasticidad y el índice de plasticidad es superior a 7.

Grupo CH: En este grupo el contenido de finos afecta a las características de resistencia, esfuerzo-deformación y drenaje de la fracción gruesa, en la práctica esto ocurre para porcentajes superiores al 12%, la plasticidad de los finos de este grupo es alta, está definida por el límite líquido mayor a 50%.

4.7. Caracterización geomecánica de los suelos

A fin de desarrollar el análisis de estabilidad del talud, se requiere contar con los parámetros geotécnicos de cada uno de los estratos identificados en el sitio, en los estudios desarrollados por el MTOP se presenta se identifican dos capas de suelo, la primera correspondiente a una terraza aluvial con una potencia variable, además una capa subyacente correspondiente a la Formación Mangán, las características de cada una se presentan a continuación (Tabla 11):

| ESTRATO | Vs | N60 | DESCRIPCIÓN | CRITERIO | γ (kN/m ³) | COHESIÓN (kN/m ²) | ϕ (°) | JUSTIFICACIÓN |
|---------|-----|-----|-----------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|--|
| 1 | 163 | 3 | Terraza Aluvial | Friccional | 18.29 | 10.78 | 21 | Mediante la calicata se determinó una composición granulométrica de 56% de grava y 12% de finos (matriz arenarcillosa) por tal motivo no se considera la cohesión y se calcula el ángulo de fricción dentro del análisis inverso. El valor del peso específico y la cohesión se obtuvo del ensayo de corte directo realizado a la muestra (CD-2) obtenida de la extracción. Para potencias de estratos y parámetros elásticos se empleó la línea LS-10 |

| | | | | | | | | |
|---|-----|----|------------------|----------|-------|--------|---|---|
| 2 | 816 | 50 | Formación Mangan | Cohesivo | 19.45 | 169.64 | - | El estrato que sobreyace según el estudio geológico es la formación Mangán, de la campaña de exploración mediante perforaciones a rotación y percusión se determinaron parámetros geomecánicos para caracterizar la formación Mangán, se emplean los parámetros de la perforación PM-3 a una profundidad de 5.00 metros mediante ensayo de compresión simple. *En la perforación se determinó la presencia de nivel piezométrico del agua a 3.30m |
|---|-----|----|------------------|----------|-------|--------|---|---|

Tabla 11: Parámetros geomecánicos, talud IESS. Fuente: (MTOPI, 2021).

Es importante resaltar que, a pesar de la cercanía del talud tanto con la quebrada de Baguanchi, así como con el río Tomebamba, los ensayos de campo determinan que el nivel freático se encuentra a 3.30m por debajo del pie del talud, por lo que se prevé que no influya sobre la estabilidad del mismo.

4.8. Análisis de estabilidad del talud en condiciones actuales

En la actualidad, el talud se encuentra cubierto de vegetación (Figura 39), además cuenta con un muro de contención en el pie, conformado por gaviones de dos a tres metros de altura, se pueden observar pequeños deslizamientos que han sido retenidos por el muro de gaviones, sin embargo, este último se encuentra deformado en sitios específicos.



Figura 39: Muro de contención de pie del talud IESS, fuente: GOOGLE EARTH.

Los parámetros geomecánicos de cada uno de los estratos se han tomado de los estudios geotécnicos desarrollados por el MTOP, la estabilidad se ha verificado utilizando el software SLOPE/W de GeoStudio, con lo que se verifica que el talud se encuentra estable ya que presenta un factor de seguridad de 1.53, tal como se muestra en la Figura 40, para el análisis se utilizó el método Morgenstern-Price basado en la teoría de Equilibrio Límite.

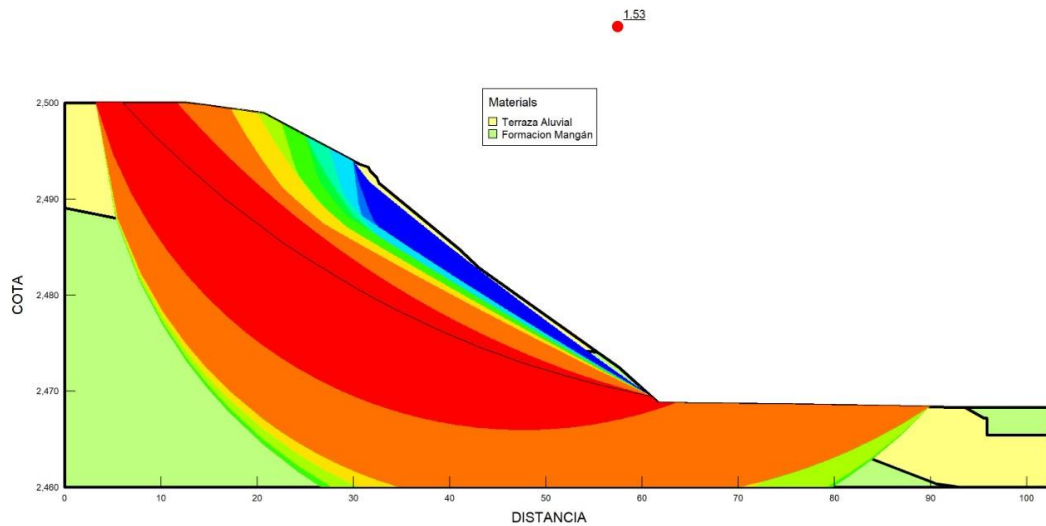


Figura 40: Estabilidad en condiciones actuales, talud IESS.

La zona de seguridad muestra que las superficies de falla con menor factor de seguridad se desarrollan a partir de los 16 m de la cara del talud.

Al considerar el análisis pseudo estático, se corrobora la estabilidad del talud, toda vez que el factor de seguridad es $FS=1.06$; superior al valor mínimo establecido en la Norma Ecuatoriana de Construcción (1.05), como se detalla en la Figura 41.

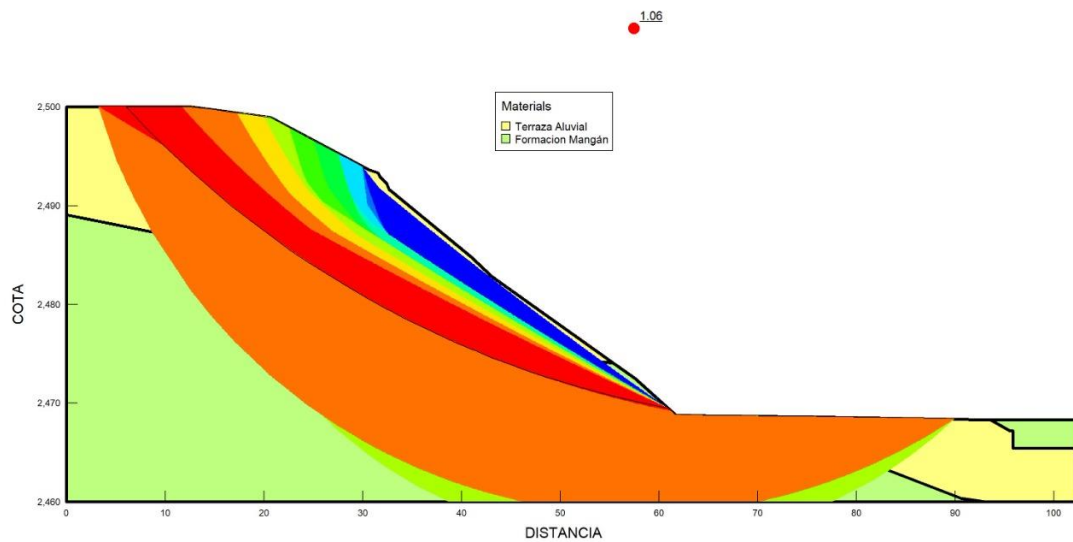


Figura 41: Estabilidad en condiciones actuales con carga sísmica, talud IESS.

4.9. Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con terraceo

La intervención propuesta implica un corte de 5m en el pie del talud, para lograr que el talud intervenido cumpla con el factor de seguridad mínimo de 1.5 en el análisis estático y 1.05 en el análisis pseudo estático, según lo establece la NEC, es necesario conformar terrazas. Se analizaron diferentes propuestas proponiendo finalmente la conformación de 5 terrazas, cada una ubicada a 6m de altura respecto de la anterior, con bermas de 5m de ancho, es decir el talud se conforma con una relación 2V:1H, como se muestra en la Figura 42, además es necesario la incorporación de un tratamiento para controlar la erosión, en este caso se ha considerado hormigón lanzado.

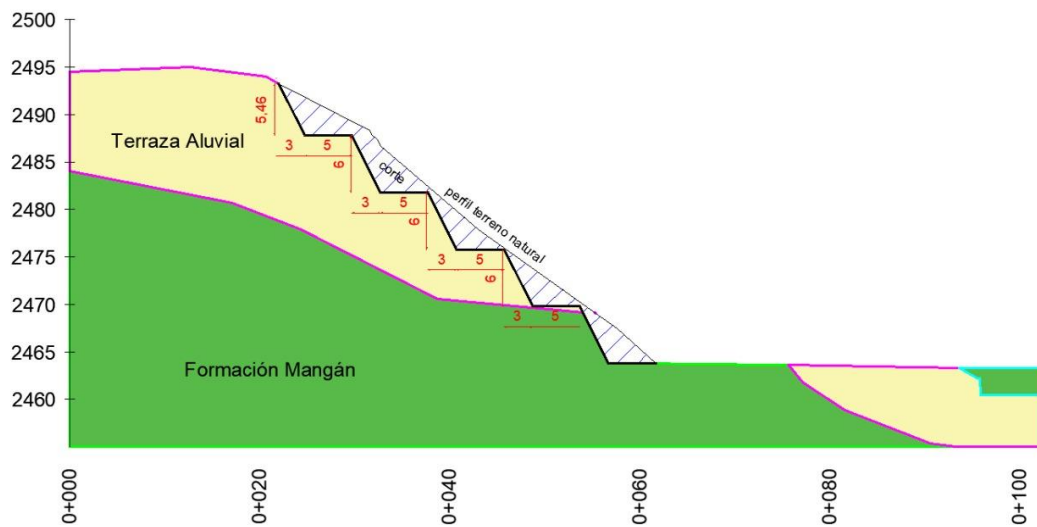


Figura 42: Geometría de la propuesta de terraceo - talud IESS.

4.9.1. Análisis en condición estática

Como se muestra en la Figura 43, la propuesta de terraceo es estable ya que cumple con el FS mínimo de 1.50, además la zona de seguridad tiene una configuración similar a la presentada en el estado actual.

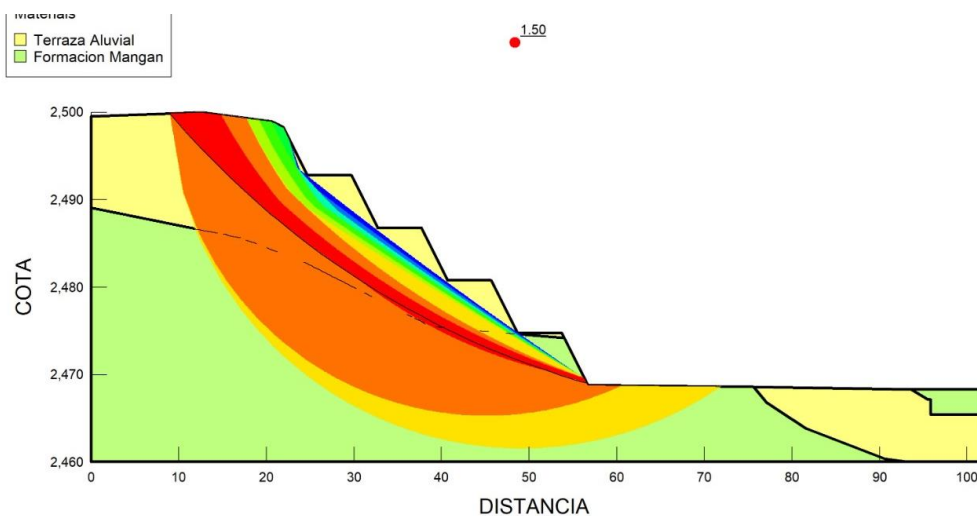


Figura 43: Propuesta de terraceo, análisis en condición estática - talud IESS.

4.9.2. Análisis en condición pseudo estática

Como se describió en el numeral 3.10.2 Análisis en condición pseudo estática, la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC, 2015) determina que la demanda sísmica para el análisis pseudoestático es del 60% de la aceleración máxima, para lo cual se utiliza la siguiente expresión:

$$k_h = \frac{0.6(z * Fa)}{g}$$

De igual manera se tiene un valor de $Z=0.25$ ya que corresponde a la misma zona sísmica que le corresponde al talud 12 de Octubre; para determinar el factor de sitio (Fa) consideramos que el suelo en estudio corresponde al Tipo E, de acuerdo a la Tabla 6 Tabla 1, ya que tiene un $V_s=163$ m/s, con lo que se determina un factor de sitio $Fa=1.4$, de conformidad con lo establecido en la Tabla 7.

Finalmente, se determina el coeficiente de carga sísmica horizontal k_h .

$$k_h = 0.6 * Z * Fa$$
$$k_h = 0.6 * 0.25 * 1.4$$
$$k_h = 0.21$$

La propuesta de terraceo tiene un factor de seguridad $FS=1.08$, cumpliendo con el mínimo $FS=1.05$, tal como se muestra en la Figura 44, por lo que se considera que la solución es adecuada, además la zona de seguridad se desarrolla en su mayor parte sobre la terraza aluvial.

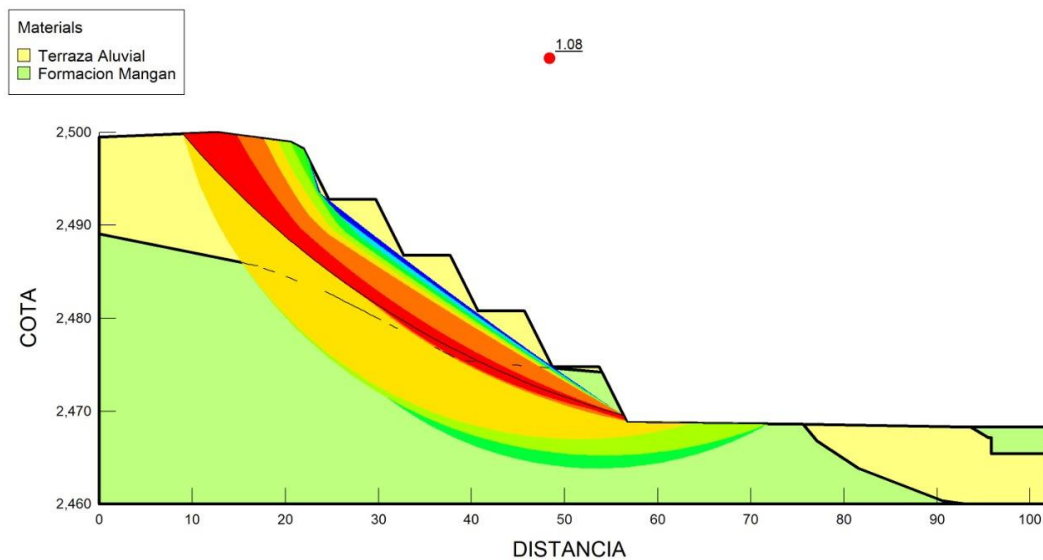


Figura 44: Análisis pseudo estático, terraceo talud IESS.

4.10. Análisis de estabilidad de la propuesta de intervención con soil nailing.

El análisis se desarrolla siguiendo la misma metodología utilizada para el talud 12 de Octubre, es decir tomando las recomendaciones de la Federal Highway Administration – FHWA de los Estados Unidos de Norte América en su Manual Técnico “Soil Nail Walls” (Lazarte et al, 2003). El talud se

configura con un corte de 5m en el pie, con una altura total de 30m y una inclinación de 34° con respecto a la vertical, con la geometría que se detalla en la Figura 45.

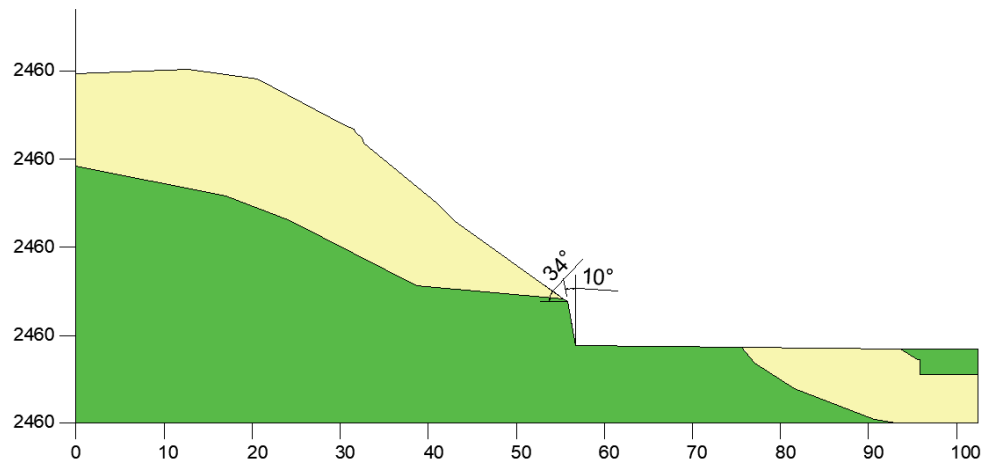


Figura 45: Geometría del talud propuesto – Soil nail, talud IESS.

4.10.1. Prediseño

A fin de desarrollar el prediseño se toma como premisa que el área de aporte de un nail (clavo) es de aproximadamente 4 m², por lo que la separación horizontal y vertical podría ser desde 1 m hasta 2 m, asumiendo para el prediseño una separación de 1 m en horizontal y 2 m en vertical; el diámetro de perforación recomienda la FHWA que puede ser desde 100 mm hasta 200 mm, en este caso se ha tomado de 200 mm; además, considerando que la mayor parte del sistema de refuerzo se desarrollará en la Formación Mangán, se toman los parámetros geomecánicos de este suelo para el prediseño.

La **capacidad al arrancamiento normalizada** está definida por la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{q_u D_{DH}}{FS_p \gamma S_H S_V}$$

En donde:

q_u = capacidad de arrancamiento

D_{DH} = diámetro de perforación

FS_p = Factor de seguridad arrancamiento

γ = peso específico del suelo

S_H = separación horizontal

S_V = separación vertical

Como datos iniciales para el prediseño se ha tomado:

D_{DH} = 200 mm

FS_p = 2 (Lazarte et al, 2003).

γ = 19.45 kN/m³

S_H = 1m

$$S_v = 2m$$

La resistencia al arrancamiento se ha tomado de bibliografía, de acuerdo al tipo de suelo, la Formación Mangán corresponde a una Arcilla de alta plasticidad (CH), para arcillas duras la resistencia al arrancamiento varía de 40 kPa a 60 kPa, considerando la Tabla 12, por lo que se toma un valor de 50 kPa.

| Material | Construction Method | Soil/Rock Type | Ultimate Bond Strength, τ_u (kPa) |
|--------------------|---------------------|-----------------------|--|
| Rock | Rotary Drilled | Marl/limestone | 300–400 |
| | | Phyllite | 100–300 |
| | | Chalk | 500–600 |
| | | Soft dolomite | 400–600 |
| | | Fissured dolomite | 600–1000 |
| | | Weathered sandstone | 200–300 |
| | | Weathered shale | 100–150 |
| | | Weathered schist | 100–175 |
| | | Basalt | 500–600 |
| | | Slate/Hard shale | 300–400 |
| Cohesionless soils | Rotary drilled | Sand/gravel | 100–180 |
| | | Silty sand | 100–150 |
| | | Silt | 60–75 |
| | | Piedmont residual | 40–120 |
| | | Fine colluvium | 75–150 |
| | Driven casing | Sand/gravel | |
| | | Low overburden | 190–240 |
| | | High overburden | 280–430 |
| | | Dense moraine | 380–480 |
| | Augered | Colluvium | 100–180 |
| | | Silty sand fill | 20–40 |
| | | Silty fine sand | 55–90 |
| | Jet grouted | Silty clayey sand | 60–140 |
| | | Sand | 380 |
| | | Sand/gravel | 700 |
| Fine-Grained Soils | Rotary drilled | Silty clay | 35–50 |
| | Driven casing | Clayey silt | 90–140 |
| | Augered | Loess | 25–75 |
| | | Soft clay | 20–30 |
| | | Stiff clay | 40–60 |
| | | Stiff clayey silt | 40–100 |
| | | Calcareous sandy clay | 90–140 |

Tabla 12: Resistencia al arrancamiento para Soil Nail en suelo y roca. (Elias & Juran, 1991)

Obteniendo como resultado:

$$\mu = 0.13$$

La **cohesión normalizada** se determina con la siguiente expresión:

$$c^* = \frac{c}{\gamma H}$$

En donde:

$c = 169.6$ kPa = cohesión

$\gamma = 19.45$ kN/m³ = peso específico del suelo

H = 30m = altura del muro

c* = 0.3 = cohesión normalizada

Con esta información se obtiene la relación L/H y la tensión máxima del perno considerando el ábaco de la Figura 29, para ingresar al ábaco se consideró un $\phi=27^\circ$, tomando en cuenta los valores de la Tabla 13.

| Tipo de suelo | θ° (grados) |
|----------------------------------|---|
| <i>Arena: granos redondeados</i> | |
| Suelta | 27 - 30 |
| Media | 30 - 35 |
| Densa | 35 - 38 |
| <i>Arena: granos angulares</i> | |
| Suelta | 30 - 35 |
| Media | 35 - 40 |
| Densa | 40 - 45 |
| <i>Grava con algo de arena</i> | 34 - 48 |
| Arcillas consolidadas | 20 - 30 |
| Limos | 26 - 35 |

Tabla 13: Ángulos de fricción interna (Das, 1999).

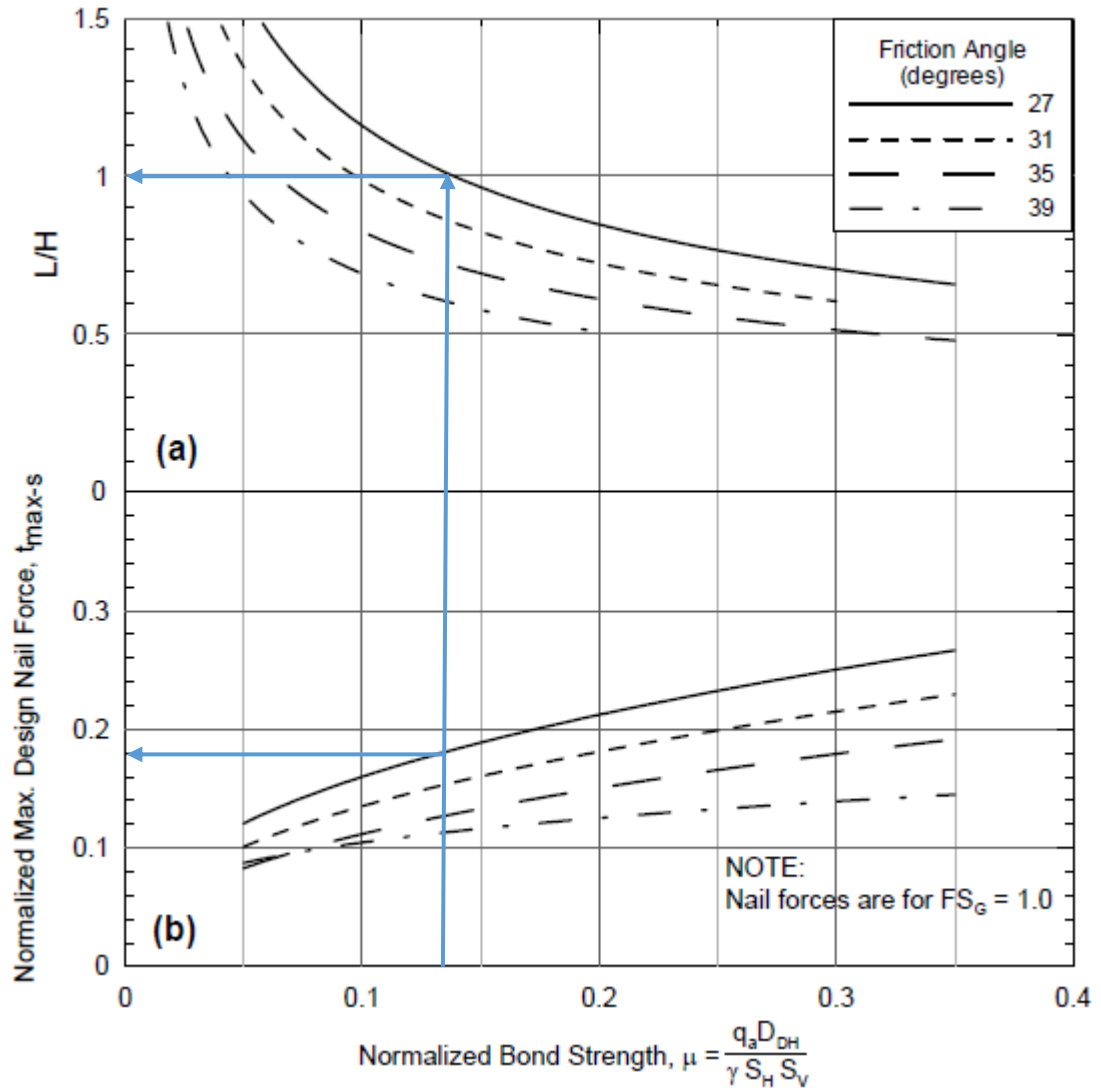


Figura 46: L/H y t_{max-s} para un talud de 10° (Lazarte et al, 2003).

Obteniendo como resultado:

$$\frac{L}{H} = 1.0$$

$$t_{max-s} = 0.18$$

En la Figura 47 se muestra la geometría del talud utilizada para generar el ábaco, considerando que el talud en análisis tiene una configuración diferente, es necesario realizar correcciones a los valores obtenidos del mismo.

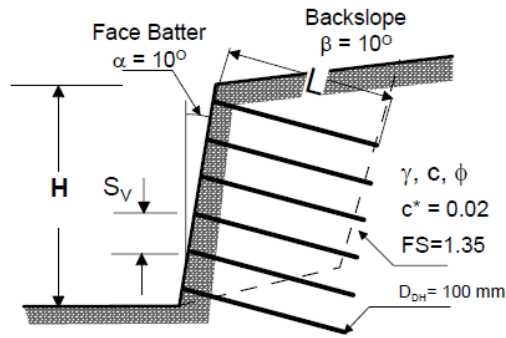


Figura 47: Geometría del talud para generar el ábaco (Lazarte et al, 2003).

Corrección de la longitud:

$$\frac{L}{H} \text{ corregido} = \frac{L}{H} * C_{1L} * C_{2L} * C_{3L}$$

En donde:

C_{1L} = Corrección por el diámetro del sondeo, Figura 31.

$C_{2L} = -4.0 c^* + 1.09 \geq 0.85$ Corrección por la cohesión.

$C_{3L} = 0.52 FS + 0.30 \geq 1.0$ Corrección por el Factor de Seguridad Global FS_G .

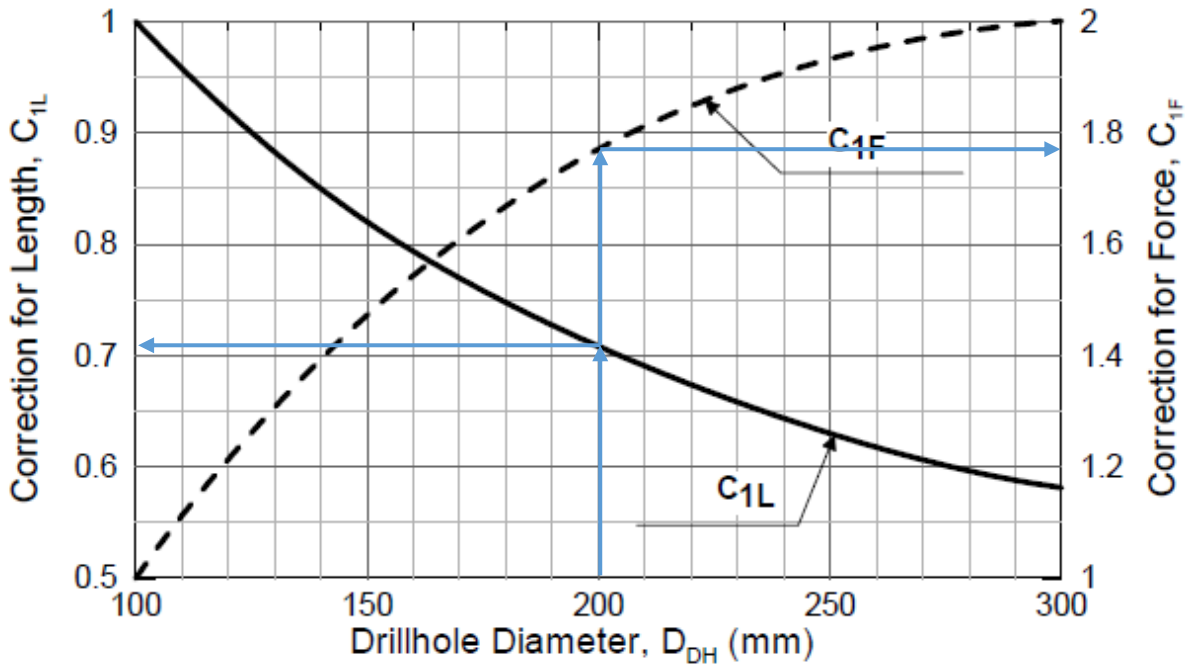


Figura 48: Factores para corrección por el diámetro de perforación (Lazarte et al, 2003).

Para este caso:

$C_{1L} = 0.72$

$C_{2L} = 0.85$ Corrección por la cohesión, se toma 0.85.

$C_{3L} = 1.08$ Corrección por el Factor de Seguridad Global FS_G , se toma 1.00.

$$\frac{L}{H} \text{ corregido} = 0.66$$

Corrección de la tensión:

$$t_{max} \text{ corregido} = t_{max} * C_{1F} * C_{2F}$$

En donde:

C_{1F} = Corrección por el diámetro del sondeo, Figura 48.

$C_{2F} = -4.0 c^* + 1.09 \geq 0.85$ Corrección por la cohesión.

Para este caso:

$C_{1F} = 1.78$ Corrección por el diámetro del sondeo, Figura 48.

$C_{2F} = 0.85$ Corrección por la cohesión, se toma 0.85.

$$t_{max} \text{ corregido} = 0.27$$

Con lo cual se obtienen:

Longitud del perno:

$$L = 19.8 \text{ m}$$

Carga máxima de diseño para el perno:

$$T_{max-s} = t_{max-s} \gamma H S_H S_V$$

$$T_{max-s} = 317.82 \text{ kN}$$

La **sección del acero** necesaria para resistir esta carga corresponde a una varilla de $D=38\text{mm}$, considerando un factor de seguridad a la tracción de 1.8 con un acero de 420 MPa.

$$Anb = \frac{FS_t T_{max-s}}{fy}$$

$$Anb = 1135 \text{ mm}^2$$

4.10.2. Diseño final.

A fin de establecer el diseño definitivo, se debe considerar que el diámetro de la varilla para el nail sea un diámetro comercial, por lo que se toma una varilla de 36 mm de diámetro, con lo que se procede a verificar que la solución establecida en el prediseño cumpla satisfactoriamente con las condiciones de estabilidad del talud.

4.10.2.1. Estabilidad global, análisis en condición estática.

El análisis de estabilidad global se desarrolla en el software GeoStudio, considerando la instalación de clavos de acero de 36mm de diámetro, se ingresó con una separación inicial de 2m en vertical y 1m en horizontal, a lo largo de todo el talud, sin embargo, se obtiene un factor de seguridad superior al mínimo establecido en la norma, por lo que se analiza variando la separación horizontal a 2m y se retiran los nails de la parte alta hasta llegar a un FS de 1.5, debido a la configuración del talud se implementan 2 filas de nails de 13 m de longitud en el pie del talud, y 14 filas de 18 m de longitud, como se muestra en la Figura 49/Figura 32.

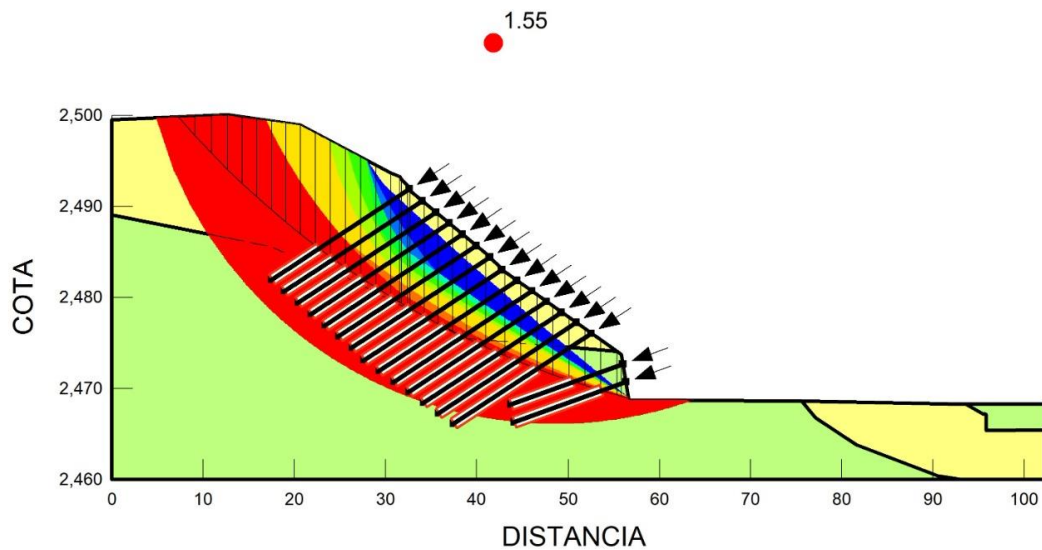


Figura 49: Estabilidad global – soil nail – análisis estático, talud IESS.

Se aprecia que el sistema de soil nailing está cubriendo la zona de seguridad de la parte baja del talud, además todos los clavos atraviesan la superficie de falla crítica.

4.10.2.2. Estabilidad global, análisis en condición pseudo estática.

Los parámetros sísmicos para el análisis son los descritos en el numeral 4.9.2 Análisis en condición pseudo estática, en este caso el FS debe ser mayor a 1.05, conforme lo establece la NEC; una vez realizado el análisis con el software SLOPEW de Geostudio, se determinó que cumple con la normativa como se muestra en la Figura 50.

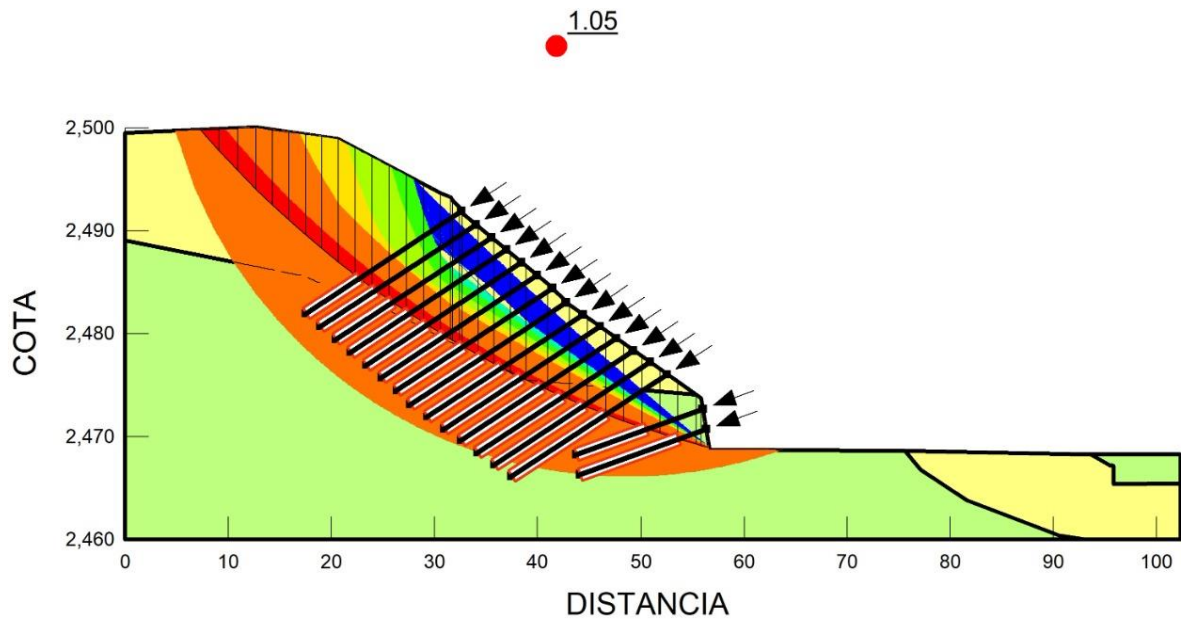


Figura 50: Estabilidad global – soil nail – análisis pseudo estático, talud IESS.

La zona de seguridad tiene un comportamiento similar a la presentada en el talud original, además todos los nails atraviesan esta zona de seguridad.

5. COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN

5.1. Costos de construcción

Los costos de construcción se generan utilizando la metodología de análisis de precios unitarios de cada una de las actividades (rubros) que se requieren para la ejecución de las obras, con la finalidad de estandarizar el análisis de costos se estableció que los taludes tendrán una longitud de diez metros, con lo cual se determinan cantidades de obra de cada uno de los rubros que intervienen en el presupuesto, entre los componentes relevantes se encuentra la escombrera ya que además de cumplir con características técnicas adecuadas para recibir grandes volúmenes de material debe contar con la aceptación social para su implementación, el costo de construcción de cada uno de los taludes y opciones de diseño se presenta desde la Tabla 14 hasta la Tabla 21.

5.2. Costos de movimiento de tierras.

Entre los rubros más representativos en este tipo de obras se encuentran los relacionados con el movimiento de tierras (excavación, transporte y disposición final), resaltando además que de estas actividades el costo de transporte es variable en función de la distancia a la cual se encuentra el sitio para la disposición final del material, por lo que se han elaborado tres presupuestos que permiten analizar la variabilidad del costo final de la obra en función de la distancia a la cual se encuentra la escombrera, como se muestra desde la Tabla 14 hasta la Tabla 21.

En la Tabla 14 se detalla el presupuesto para la intervención en el talud 12 de Octubre, considerando una distancia de transporte de 10 km hasta la escombrera, mientras en la Tabla 15 se muestra el mismo presupuesto pero con una distancia de transporte de 20 km.

| 12 DE OCTUBRE TERRACEO | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 10 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 21,641.63 | 45.69% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 6,471.04 | 13.66% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 15,170.59 | 32.03% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 25,725.29 | 54.31% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 25,107.91 | 53.01% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 617.38 | 1.30% |
| | | 47,366.92 | 100% |

Tabla 14: Costo de construcción – terraceo, talud 12 de octubre (10 km).

| 12 DE OCTUBRE TERRACEO | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 20 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 33,452.27 | 56.48% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 6,471.04 | 10.93% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 26,981.23 | 45.56% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 25,773.29 | 43.52% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 25,107.91 | 42.39% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 665.38 | 1.12% |
| | | 59,225.56 | 100% |

Tabla 15: Costo de construcción – terraceo, talud 12 de octubre (20 km).

Se puede observar que, al variar la distancia hasta la escombrera de 10 km a 20 km, el presupuesto se ha incrementado en un 25%. En la Tabla 16 se detalla el presupuesto de la intervención con terrazas considerando una distancia hasta la escombrera de 25 km, distancia con la cual

prácticamente se equipara al costo de construcción con soil nailing, tal como se detalla el presupuesto de este último en la Tabla 17.

| 12 DE OCTUBRE TERRACEO | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 25 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 39,357.59 | 60.41% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 6,471.04 | 9.93% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 32,886.55 | 50.47% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 25,797.29 | 39.59% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 25,107.91 | 38.54% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 689.38 | 1.06% |
| | | 65,154.88 | 100% |

Tabla 16: Costo de construcción – terraceo, talud 12 de octubre (25 km).

| 12 DE OCTUBRE SOIL NAILING | | | |
|-----------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 25 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 8,929.04 | 13.74% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 1,479.93 | 2.28% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 7,449.11 | 11.47% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 56,040.15 | 86.26% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 55,385.74 | 85.25% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 654.40 | 1.01% |
| | | 64,969.19 | 100% |

Tabla 17: Costo de construcción – soil nailing, talud 12 de octubre (25 km).

En el caso del talud del IESS, también se calcularon los costos de construcción para la propuesta de terraceo con distancias de acarreo a la escombrera de 10 km y 20 km, el incremento de costo por una mayor distancia de transporte es del 9%, esto al comparar el costo para 10 km que se muestra en la Tabla 18 con el costo de construcción con un transporte de 20 km que se muestra en la Tabla 19.

| TALUD IESS - TERRACEO | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 10 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 4,320.93 | 16.14% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 1,286.33 | 4.80% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 3,034.61 | 11.33% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 22,455.87 | 83.86% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 21,412.76 | 79.97% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 1,043.11 | 3.90% |
| | | 26,776.80 | 100% |

Tabla 18: Costo de construcción – terraceo, talud IESS (10 km).

| TALUD IESS - TERRACEO | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 20 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 6,643.17 | 22.68% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 1,286.33 | 4.39% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 5,356.85 | 18.29% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 22,647.87 | 77.32% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 21,412.76 | 73.10% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 1,235.11 | 4.22% |
| | | 29,291.04 | 100% |

Tabla 19: Costo de construcción – terraceo, talud IESS (20 km).

Se evalúa también el costo de construcción a una distancia de equilibrio, es decir a una distancia a la cual se equipara el costo de construcción mediante la reconfiguración del talud (terraceo), con el costo de construcción implementando el sistema soil nailing, valores que se presentan en la Tabla 20 y en la Tabla 21.

| MONAY TERRACEO | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 94 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 23,827.75 | 49.75% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 1,286.33 | 2.69% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 22,541.42 | 47.06% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 24,068.67 | 50.25% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 21,412.76 | 44.71% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 2,655.91 | 5.55% |
| | | 47,896.42 | 100% |

Tabla 20: Costo de construcción – terraceo, talud IESS (94 km).

| MONAY SOIL NAILING | | | |
|--------------------------------|---|------------------|---------------|
| DISTANCIA DE ESCOMBRERA | | 94 | km |
| ÍTEM | DESCRIPCIÓN | P. TOTAL | % |
| 1 | OBRA BÁSICA Y CONFORMACIÓN DE PLATAFORMA | 1,079.86 | 2.25% |
| 1.1 | MOVIMIENTO DE TIERRAS | 190.51 | 0.40% |
| 1.2 | TRANSPORTE DE MATERIALES Y DISPOSICIÓN FINAL | 889.35 | 1.85% |
| 2 | OBRAS DE SOSTENIMIENTO Y ESTABILIDAD | 46,876.73 | 97.75% |
| 2.1 | ESTABILIZACIÓN DE TALUDES | 46,225.84 | 96.39% |
| 2.2 | CUNETAS EN BERMAS, CUNETAS DE CORONACIÓN | 650.89 | 1.36% |
| | | 47,956.58 | 100% |

Tabla 21: Costo de construcción – soil nailing, talud IESS (94 km).

El punto de equilibrio se presenta a una distancia de 94 km debido a que el volumen de movimiento de tierras para el terraceo es de 96m^3 por cada metro de longitud del talud en estudio, lo que origina que el costo de transporte represente apenas el 11% cuando la distancia de transporte es de 10 km y un 18% cuando la escombrera está a 20 km.

5.3. Análisis de variación de costo de las alternativas de diseño.

El costo de construcción se incrementa en función de la distancia a la cual se encuentra la escombrera, para el caso del talud 12 de Octubre se observa que la variación entre el costo de las dos alternativas de estabilización varía desde un 22.2% cuando la escombrera se sitúa a 10 km, reduciéndose esta diferencia a un 6.9% cuando la escombrera se sitúa a 20 km, para finalmente equipararse cuando la escombrera se encontraría a una distancia de 25km, como se muestra en la Figura 51 y en la Tabla 22.

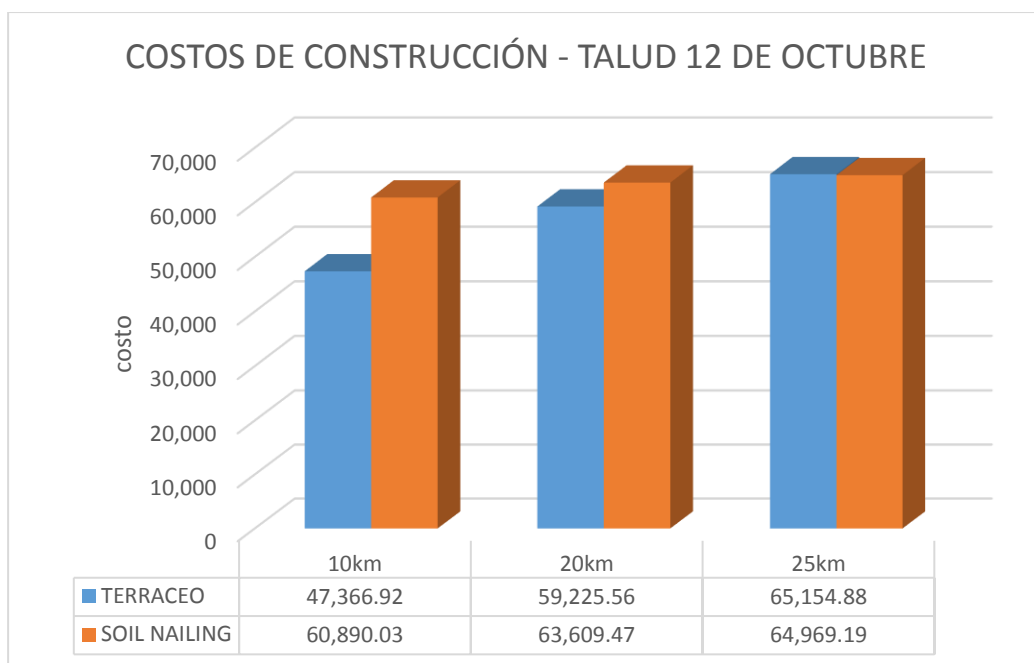


Figura 51: Comparación de costos de construcción, talud 12 de Octubre.

| COSTOS DE CONSTRUCCIÓN 12 DE OCTUBRE | | | |
|--------------------------------------|---------------------|--------------|----------------|
| DISTANCIA | MÉTODO CONSTRUCTIVO | | % DE VARIACIÓN |
| | TERRACEO | SOIL NAILING | |
| 10 | 47,366.92 | 60,890.03 | 22.21% |
| 20 | 59,225.56 | 63,609.47 | 6.89% |
| 25 | 65,154.88 | 64,969.19 | -0.29% |

Tabla 22: Comparación de costos de construcción, talud 12 de Octubre.

En el caso del talud IESS el volumen de movimiento de tierras es menor en relación al talud 12 de Octubre, sin embargo a medida que se incrementa la distancia también se incrementa el costo de la estabilización con terracedo, pero el punto de equilibrio en este caso se encuentra alrededor de los 94 km de distancia de transporte, como se muestra en la Figura 52 y en la Tabla 23. Con una distancia de 10 km el soil nailing es un 43.1% más costoso que la propuesta de terracedo, esta diferencia se reduce a un 20.7% cuando la escombrera se ubica a 20km; y, finalmente se equipara el costo a los 94 km.

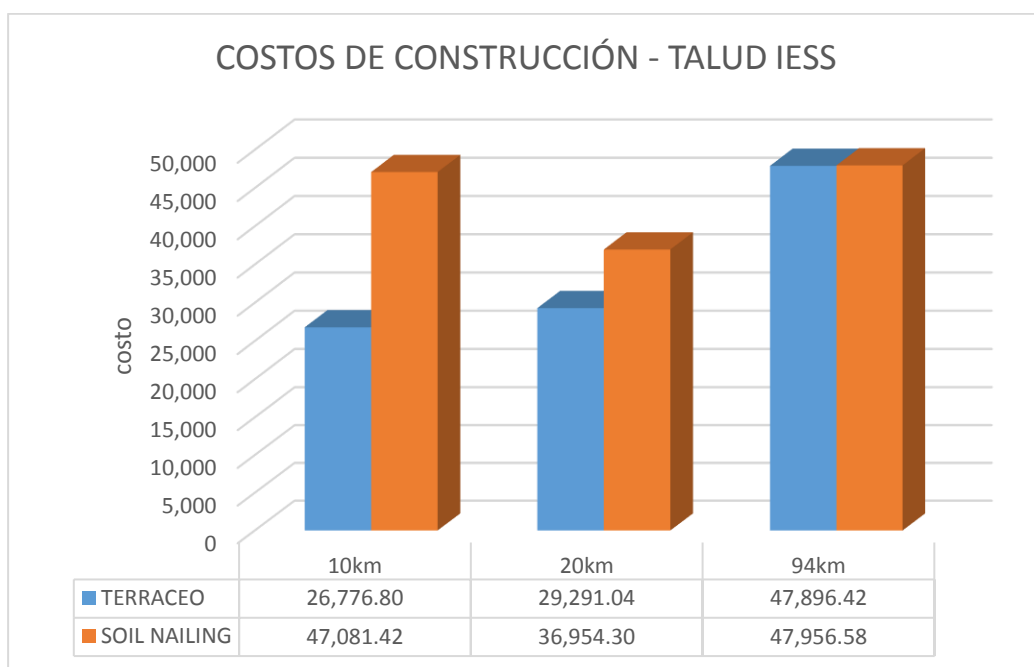


Figura 52: Comparación de costos de construcción, talud IESS.

| COSTOS DE CONSTRUCCIÓN MONAY | | | |
|------------------------------|---------------------|--------------|----------------|
| DISTANCIA | MÉTODO CONSTRUCTIVO | | % DE VARIACIÓN |
| | TERRACEO | SOIL NAILING | |
| 10 | 26,776.80 | 47,081.42 | 43.13% |
| 20 | 29,291.04 | 36,954.30 | 20.74% |
| 94 | 47,896.42 | 47,956.58 | 0.13% |

Tabla 23: Comparación de costos de construcción, talud IESS

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los estudios realizados, se pueden emitir las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- Las condiciones geológicas y geotécnicas del austro del país, sumadas a las condiciones climáticas de la zona dan origen a la continua presencia de deslizamientos que afectan a la red vial, generando problemas de movilidad a los usuarios y por lo general un incremento en los costos de transporte de personas y mercancías, por lo que la estabilización de taludes es una necesidad permanente de las entidades gubernamentales responsables del mantenimiento de la red vial, en este sentido, es necesario optimizar los recursos disponibles que permitan intervenciones a menor costo o en menor tiempo.
- El diseño e implementación de bermas y taludes con pendientes adecuadas logra estabilizar las zonas en estudio, sin embargo, considerando las condiciones topográficas y el tipo de suelo a intervenir, el diseño varía y con este el volumen de movimiento de tierras, generándose costos

adicionales por actividades complementarias como el transporte y la disposición final del material retirado de los taludes para lograr su estabilidad.

- La técnica de soil nailing es una alternativa válida para estabilización de taludes en distintos tipos de suelo; en los dos casos estudiados se logró estabilizar los taludes cumpliendo con los factores de seguridad mínimos establecidos en la normativa ecuatoriana (NEC, 2015), a costos comparables con la alternativa de terracedo.
- El costo de construcción en todos los casos varía en función de la distancia al sitio destinado para depositar el material producto de las excavaciones, así como del volumen de material que debe ser retirado para implementar cada solución, sin embargo, en cada caso se tienen distintos rangos de variación de volúmenes y costos.
- En el caso del talud estudiado en el Redondel 12 de Octubre, si la escombrera se encuentra a 10 km, la propuesta de intervención con soil nailing es un 22% más costosa que la estabilización con terracedo, mientras que si la escombrera se encuentra a 20 km esta diferencia baja a un 7% y el punto de equilibrio se encuentra a 25 km. Es decir, si la escombrera se encuentra a esta distancia, el costo de las dos propuestas es similar.
- En el caso del talud del Redondel IESS se presentan resultados diferentes, si el sitio de desalojo se encuentra a 10 km, implementar un sistema de soil nailing sería 43% más costoso que realizar un terracedo, si la escombrera se encuentra a 20 km esta diferencia baja al 38% y el punto de equilibrio se encuentra a los 94 km. Vale la pena hacer notar que, en muchos de los proyectos dentro de las ciudades, las escombreras se encuentran distantes del sitio de trabajo.
- Por lo expuesto, la estabilización de suelos con soil nailing es una alternativa de construcción que puede ser de menor costo cuando el movimiento de tierras es un componente representativo del proyecto.
- Cuando la estabilización de un talud mediante la implementación de terrazas y bermas requiera grandes volúmenes de movimiento de tierras, se sugiere analizar otras alternativas de estabilización, como es el caso de la técnica soil nailing.
- Previo a definir un diseño de estabilización es importante considerar alternativas de solución en las cuales se consideren aspectos como: costos de construcción, disponibilidad de áreas de trabajo, tiempo de construcción, distancia y disponibilidad de sitios para escombrera; y, aspectos sociales. En este sentido la estabilización con soil nailing es una alternativa válida ya que genera menores movimientos de tierras, requiere de menores áreas de operatividad e intervención, generando menores impactos sociales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Secretaría Nacional de Planificación. (2007). *Plan Nacional de Desarrollo - Política de Transporte e Infraestructura para la Movilidad y Logística*.
- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto GEográfico, UNAM(41)*, 7-25.
- Asociación de carreteras del Japón. (1984). *Manual de protección de taludes*. Tokio. Obtenido de <http://www.jorgealvahurtado.com/files/Manual%20de%20Proteccion%20de%20Taludes.pdf>
- Bojorque, J. (2011). Métodos para el análisis de estabilidad de pendientes. *MASKANA*, 2(2), 1-16.
- Capa Guachón, V. E. (2021). *Estudio experimental y numérico del comportamiento de excavaciones ejecutadas mediante la técnica de suelo claveteado (soil nailing) en los suelos de la ciudad de Quito (Ecuador)*. Valencia, España.
- Carlos A. Lazarte, P. P., Helen Robinson, P., Jesús E. Gómez, P. P., & Andrew Baxter, P. (Febrero de 2015). Soil Nail Walls - Reference Manual . (F. H. Administration, Ed.) *Geotechnical Engineering*, N° 7(FHWA-NHI-14-007).
- Carlos A. Lazarte, P. P., Víctor Elias, P., R. David Espinoza, P. P., & Paul J. Sabatini, P. P. (Marzo de 2003). Soil Nail Walls. *Geotechnical Engineering*, N° 7 (FHWA0-IF-03-017).
- Cruden, & Varnes. (1996). Landslides types and processes. *Transportation Reserch Board, Special Report 247(247)*, 36-75.
- Das, B. M. (1999). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. California: Thomson Learning. doi:970-686-061-4
- De Matteis, A. (Agosto de 2003). *Estabilidad de Taludes*. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>
- Diario El Mercurio. (23 de Agosto de 2021). La vía Cuenca - Molleturo estará cerrada desde el martes hasta el viernes en horarios programados. Obtenido de <https://elmercurio.com.ec/2021/08/23/via-cuenca-molleturo-cerrada-esta-semana-horario-programado/>
- Diario El Mercurio. (18 de Agosto de 2021). Terraceo, alternativa ante los deslaves en la Cuenca-Molleturo. *Diario El Mercurio*. Recuperado el 4 de Octubre de 2021, de <https://elmercurio.com.ec/2021/08/18/terraceo-alternativa-ante-los-deslaves-en-la-cuenca-molleturo/>

- Diario Expreso. (24 de Marzo de 2019). Carretera fue cerrada por derrumbe en Azuay. *Diario Expreso*. Recuperado el 4 de Octubre de 2021, de <https://www.expreso.ec/actualidad/carretera-cerrada-derrumbe-azuay-16810.html>
- Elias, V., & Juran, I. (1991). Soil Nail for Stabilization of Highway Slopes and Excavations. *Federal Highway Administration*(Report No. FHWA-RD-89-1989).
- GADM Cuenca. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca, Actualización 2015*. Cuenca: Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca.
- Juarez, E., & Rico, A. (2005). *Fundamentos de la mecánica de suelos*. Mexico DF: EDITORIAL LIMUSA. doi:ISBN 968-18-0069-9
- Keller. (2021). *www.keller.com*. Recuperado el 04 de Octubre de 2021, de <https://www.keller.com/expertise/techniques/soil-nails>
- Lazarte et al, C. (2003). Soil Nail Walls. *Geotechnical Engineering*, N° 7(FHWA0-IF-03-017).
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2019). *www.obraspublicas.gob.ec*. Recuperado el 04 de Octubre de 2021, de <https://www.obraspublicas.gob.ec/se-activa-plan-de-contingencia-para-estabilizacion-de-talud-en-el-km-18-de-la-via-cuenca-azogues-2/>
- MTOP. (2021). *Estudios de prefactibilidad, factibilidad, impactos ambientales e ingeniería definitivos para la solución de conflictos de movilidad de la autopista Cuenca - Azogues - Bilbián*. MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS. Cuenca: AUTOR.
- NEC. (2015). *Norma Ecuatoriana de Construcción 2015*. Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). Movimientos en masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional*(4), 432. doi:0717-3733
- Rico Rodriguez, A., & Del Castillo, H. (2006). *La Ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. México: Limusa. doi:978-968-18-0054-3
- Sanhuesa Plaza, C., & Rodriguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17-29.
- Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamiento y estabilización de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suarez-Burgoa, L. (2016). *Análisis de Estabilidad de Taludes*. Medellin: Autor.
- Valiente, R., Diaz, A., & Sobrecases, S. (2015). Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo. *Civilizate*(7), 50-54.

Velez, P. (2012). *Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en los suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones*. Cuenca.

Yepes, V. (5 de julio de 2019). *Universitat Politècnica de València*. Recuperado el 10 de septiembre de 2021, de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/07/05/soil-nailing-o-suelo-claveteado/>

8. ANEXOS

- Anexo1: Información geotécnica del talud 12 de Octubre.
- Anexo 2: Información geotécnica del talud IESS.
- Anexo 3: Detalle de esfuerzos en cada nail.
- Anexo 4: Detalle de costos.