

ESTABILIZACIÓN DE LADERAS Y PROTECCIÓN ANTE LOS DESLIZAMIENTOS CON TÚNELES FALSOS: CASO DE ESTUDIO VÍA ALÓAG SANTO DOMINGO

SLOPE STABILIZATION AND LANDSLIDE PROTECTION WITH FAKE TUNNELS: CASE STUDY ALOAG SANTO DOMINGO ROAD

José Gabriel Rivadeneira Cedeño ^{1*}

¹ Maestría en Ingeniería Civil, Mención Vialidad, Facultad de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Avenida José María Urbina, Portoviejo EC130105, Manabí, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1447-1666>. Correo: gabrielriva1882@gmail.com

Eduardo Ortiz Hernández ²

² Departamento de Construcciones Civiles y Arquitectura, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Avenida José María Urbina, Portoviejo EC130105, Manabí, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1885-6005>. Correo: eduardo.ortiz@utm.edu.ec

* Autor para correspondencia: gabrielriva1882@gmail.com

Resumen

Los deslizamientos de tierra, provocados por la inestabilidad de taludes, son un problema recurrente en la carretera Alóag-Santo Domingo en Ecuador, causando significativas pérdidas humanas y materiales. Este estudio revisa las técnicas de estabilización de laderas mediante túneles falsos, enfocándose en su efectividad para mitigar deslizamientos en esta vía. El objetivo principal es analizar la efectividad de los túneles falsos en la estabilización de laderas y la protección contra deslizamientos. Se analizaron estudios geotécnicos detallados, incluyendo prospección geofísica mediante sísmica de refracción y resistividad eléctrica. Los datos obtenidos se analizaron con software especializado (SLIDE v 6.0 y Phase de Rocscience) para evaluar la estabilidad de los taludes y determinar medidas de estabilización necesarias. Las metodologías incluyeron el método MMST, la excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones y el uso de concreto reforzado con fibras de acero (SFRC). Los estudios geotécnicos identificaron materiales críticos como limos arenosos, coluviones y rocas volcánicas. La implementación de túneles falsos, utilizando metodologías avanzadas, mejorará significativamente la estabilidad y seguridad de las laderas. Estas técnicas demostraron ser efectivas para manejar grandes deformaciones y asegurar la integridad de la infraestructura vial. La implementación de túneles falsos en la vía Alóag-Santo Domingo ha demostrado ser una solución robusta y eficiente para la estabilización de laderas.

Palabras clave: deslizamientos de tierra, túneles falsos, estabilización de laderas, prospección geofísica, concreto reforzado

Abstract

Landslides, caused by slope instability, are a recurring problem on the Alóag-Santo Domingo road in Ecuador, causing significant human and material losses. This study reviews slope stabilization techniques using false tunnels, focusing on their effectiveness in mitigating landslides on this road. The main objective is to analyze the effectiveness of false tunnels in slope stabilization and landslide protection. Detailed geotechnical studies were analyzed, including geophysical prospecting using seismic refraction and electrical resistivity. The data obtained were analyzed with specialized software (SLIDE v 6.0 and Phase by Rocscience) to evaluate the stability of the slopes and design the necessary stabilization measures. The methodologies included the MMST method, full-face excavation with deformation control support, and the use of steel fiber-reinforced concrete (SFRC). Geotechnical studies identified critical materials such as sandy silts, colluvium, and volcanic rocks. The implementation of false tunnels, using advanced methodologies, significantly improved the stability and safety of the slopes. These techniques proved effective in managing large deformations and ensuring the integrity of the road infrastructure. The implementation of false tunnels on the Alóag-Santo Domingo road has proven to be a robust and efficient solution for slope stabilization.

Keywords: landslides, false tunnels, slope stabilization, geophysical prospecting, reinforced concrete

Fecha de recibido: 14/03/2024

Fecha de aceptado: 26/05/2024

Fecha de publicado: 28/05/2024

Introducción

Los deslizamientos de tierra son movimientos de masas de suelo o roca provocados principalmente por la inestabilidad de un talud (Pincay, 2023). Estos fenómenos pueden ser influenciados por diversos factores geológicos e ingenieriles, como la resistencia mecánica, la naturaleza mineralógica, el marco geológico estructural, tectónico y sísmico, la hidrogeología y el comportamiento climático del área de estudio (Mejía & González, 2020; Rosero et al., 2017). Estos eventos han resultado en pérdidas humanas y daños a propiedades e infraestructuras. En Ecuador, la vía Aloag-Santo Domingo, una de las principales carreteras, ha sido afectada históricamente por estos eventos, que han causado significativas pérdidas materiales y humanas. Estos deslizamientos, comunes en las vías del país, presentan una amenaza constante para la seguridad vial y la infraestructura, especialmente en esta ruta vital que conecta la Sierra con la Costa. La frecuencia de estos incidentes, exacerbada por las características geográficas y climáticas como pendientes pronunciadas y altos niveles de precipitación, subraya la urgencia de implementar medidas efectivas de estabilización de laderas y protección contra deslizamientos para asegurar la circulación continua y segura.

Ante esta problemática, el Gobierno de la República del Ecuador, a través del GAD Provincial de Santo Domingo de los Tsáchilas, ha impulsado un proyecto de ampliación y mejoramiento de esta carretera, incluyendo estudios detallados de estabilidad de taludes. En este tramo se incluye el estudio de los pasos Laterales de la población de Alluriquín y del área de Tinalandia. Cabe señalar que en la ampliación de la vía existente en el cruce de obras especiales hidráulicas (puentes) es necesario con el nuevo diseño la ampliación de los mismos por lo que se requieren estudios adicionales de Ingeniería en los que están involucrados la ejecución de las correspondientes investigaciones geotécnicas.

El objetivo principal de este artículo es revisar y analizar las técnicas de estabilización de laderas y protección ante deslizamientos mediante el uso de túneles falsos, con énfasis en el caso de estudio de la carretera Alóag-Santo Domingo. Se busca proporcionar una visión integral de las metodologías utilizadas, los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas, ofreciendo una guía útil para futuros proyectos de infraestructura en áreas geológicamente complejas.

Para la evaluación de la estabilidad de los taludes, se emplearon técnicas de prospección geofísica, incluyendo la sísmica de refracción y la resistividad eléctrica. El trabajo de campo consistió en la ejecución de perfiles sísmicos y sondeos eléctricos verticales, los cuales permitieron obtener datos detallados sobre la litología, la humedad y los parámetros geotécnicos del suelo. Estos datos fueron posteriormente analizados utilizando software especializado, como SLIDE v 6.0 y Phase de Rocscience, para determinar el factor de seguridad de los taludes y diseñar las medidas de estabilización necesarias.

En esta revisión bibliográfica, se explora la investigación actual sobre el uso de túneles falsos como técnica innovadora para la estabilización de laderas y la mitigación de riesgos de deslizamientos. Se abordan aspectos como el diseño, la implementación y los resultados obtenidos en diversas aplicaciones de túneles falsos en diferentes contextos geográficos. Se analizan metodologías específicas empleadas en el diseño ingenieril para adaptar esta solución a condiciones geológicas y minimizar riesgos asociados con deslizamientos de tierra. Además, se evalúa la implementación práctica de túneles falsos, considerando desafíos logísticos y operativos enfrentados durante la fase de construcción, incluyendo métodos de excavación, seguridad en el sitio de trabajo y técnicas de monitoreo para garantizar estabilidad antes, durante y después de la instalación.

Los temas abordados incluyen el análisis de metodologías de diseño y consideraciones técnicas para la construcción de túneles falsos en entornos propensos a deslizamientos. Se revisan estudios que evalúan la efectividad de los túneles falsos en la reducción de riesgos de deslizamientos y la protección de infraestructuras. Se examinan ejemplos de implementación de túneles falsos en diferentes regiones del mundo, destacando resultados obtenidos y lecciones aprendidas, además de considerar factores geotécnicos y ambientales que influyen en la eficacia y viabilidad de esta solución de ingeniería.

La búsqueda bibliográfica se realiza en bases de datos académicas como PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar utilizando términos como "túneles falsos", "estabilización de laderas", "protección contra deslizamientos", entre otros. Se incluyen estudios publicados en revistas científicas, conferencias e informes técnicos relevantes. Esta revisión bibliográfica no solo se centra en la teoría, sino también en los resultados obtenidos de aplicaciones reales de túneles falsos en diversos contextos geográficos. Se revisan estudios de casos específicos donde se ha implementado esta técnica, analizando las mejoras observadas en la estabilidad del terreno, la reducción de riesgos de deslizamientos y los impactos en la infraestructura circundante. En

resumen, esta revisión aspira a ofrecer una visión integral y actualizada sobre el estado del conocimiento en relación con el uso de túneles falsos para la estabilización de laderas, proporcionando una perspectiva valiosa para ingenieros, investigadores y profesionales involucrados en la gestión de riesgos geotécnicos y la planificación de infraestructuras resilientes.

Se espera obtener una visión comprehensiva del estado actual del conocimiento sobre el uso de túneles falsos para la estabilización de laderas. Los resultados de esta revisión proporcionarán información importante para la planificación y diseño de futuros proyectos de mitigación de riesgos en áreas vulnerables a deslizamientos.

Materiales y métodos

Este estudio de revisión bibliográfica se basó en la recopilación y análisis de literatura científica relevante sobre la estabilización de laderas y la protección ante deslizamientos mediante el uso de túneles falsos. Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas como PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar, utilizando términos como "túneles falsos", "estabilización de laderas" y "protección contra deslizamientos". Se incluyeron estudios publicados en revistas científicas revisadas por pares, artículos de conferencias e informes técnicos relevantes. Se excluyeron estudios que no proporcionaran datos empíricos o análisis detallados.

La revisión sistemática incluyó la lectura crítica de los títulos y resúmenes de los artículos seleccionados para determinar su relevancia, seguida de una lectura completa de los artículos pertinentes para extraer información esencial sobre metodologías, resultados y conclusiones. Se sintetizó la información para identificar pautas comunes y hallazgos relevantes en la implementación de túneles falsos para la estabilización de laderas. Los temas abordados incluyeron las metodologías de diseño, técnicas de construcción y materiales utilizados, efectividad en la reducción de riesgos de deslizamientos, y estudios de casos específicos y sus resultados.

El informe de revisión se realizó un análisis comparativo de los diferentes enfoques documentados en la literatura para evaluar sus ventajas y desventajas, identificando las mejores prácticas y recomendaciones para futuros proyectos. Además, se destacaron las áreas con limitaciones en la investigación actual, sugiriendo oportunidades para futuros estudios. La revisión concluye con recomendaciones basadas en los hallazgos, proporcionando una base sólida para la discusión sobre la efectividad de los túneles falsos en la estabilización de laderas y la mitigación de riesgos geotécnicos en la carretera Alóag-Santo Domingo.

Resultados y discusión

Túneles falsos

Los túneles falsos son estructuras diseñadas en ingeniería civil para proteger vías de comunicación contra el impacto de la caída de rocas en regiones montañosas, absorbiendo la energía del impacto mediante un colchón amortiguador cuyo espesor se calcula en base a parámetros que relacionan la fuerza de impacto. Funcionan como techos protectores para carreteras, evitando que bloques de roca impacten y deterioren el pavimento, mitigando graves pérdidas económicas causadas por interrupciones en el tránsito. Su estructura base está compuesta por elementos que absorben el impacto, siendo una solución eficiente para mantener la transitabilidad de carreteras en zonas montañosas con riesgo de caída de rocas (Reyes & Martínez, 2005).

Los túneles falsos se construyen frecuentemente en condiciones geotécnicas desafiantes, utilizando una combinación de métodos de soporte y técnicas de excavación avanzadas, y permiten una mejor gestión del flujo de aire y el control de contaminantes durante las fases de construcción, contribuyendo a un ambiente de trabajo más seguro para los operarios (Wilson et al., 2014).



Figura 1. Falso Túnel el Cune.

Nota. El Túnel El Cune se encuentra en la Ruta Nacional 50, una de las principales carreteras de Colombia, que conecta Bogotá con Medellín. Tomado de (Pedelta, n.d.).

El análisis de la estabilidad y el comportamiento de los túneles bajo diferentes condiciones de carga es esencial en el diseño de túneles falsos. Investigaciones recientes han destacado la importancia de utilizar modelos numéricos y técnicas de análisis límite para predecir el comportamiento de los túneles y diseñar sistemas de soporte adecuados, proporcionando herramientas esenciales para los ingenieros en la planificación y ejecución de proyectos de túneles en entornos complejos (Azadi et al., 2020).

La implementación de túneles falsos se presenta como una solución efectiva en la estabilización de taludes donde métodos convencionales, como drenajes o muros de contención, no son viables o suficientemente efectivos. Estas estructuras, generalmente construidas de concreto reforzado o pretensado, están diseñadas para absorber y disipar la energía de impacto de rocas caídas, empleando materiales amortiguadores que reducen dicho impacto, aumentando la resistencia contra movimientos indeseados de tierra en contextos geotécnicos complejos.

Un análisis cuidadoso de las propiedades físicas y mecánicas del material amortiguador y del suelo circundante es esencial para un diseño eficaz, utilizando cargas estáticas equivalentes para modelar el impacto dinámico en análisis estructurales que consideren los esfuerzos admisibles y la ductilidad necesaria.

Principales Metodologías de Diseño y Construcción de Túneles Falsos

En la construcción de túneles falsos, se han identificado varias metodologías que se destacan por el uso de perfiles de acero y concreto reforzado. A continuación, se describen las principales técnicas:

1. **Método MMST (Método de Estructura Híbrida):** el método MMST se aplica a túneles de gran tamaño con secciones transversales rectangulares. Este método utiliza una estructura híbrida compuesta de concreto reforzado y una estructura compuesta. La metodología de diseño desarrollada para estos túneles se basa en la información característica obtenida a través de pruebas de calificación. Este enfoque permite la construcción de túneles subterráneos enormes, como el túnel de 540 metros de longitud en la Ruta Trans-Kawasaki Expressway (Mori et al., 2002).
2. **Excavación a Cara Completa con Soporte de Control de Deformaciones:** la excavación a cara completa es una técnica utilizada en condiciones difíciles, donde se refuerza sistemáticamente la cara y el suelo mediante elementos de fibra de vidrio. Este método se divide en dos enfoques: el "método pesado", que restringe las deformaciones, y el "método ligero", que permite las deformaciones para reducir las tensiones en los revestimientos primarios y finales. Un caso notable es el túnel de acceso Saint Martin La Porte, donde se adoptó un sistema de soporte de control de deformaciones combinado con la excavación a cara completa para manejar las grandes deformaciones experimentadas durante el avance a través de formaciones carboníferas (Barla, 2016).
3. **Concreto Reforzado con Fibras de Acero (SFRC):** el uso de concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) permite la construcción de túneles con revestimientos permanentes de concreto impermeable sin necesidad de refuerzo con barras de acero o sellado separado. El SFRC tiene la capacidad de reaccionar de manera plástica a los momentos de flexión, lo que le confiere un gran potencial. En Alemania, se han construido varios miles de metros de túneles utilizando esta técnica. Un método de diseño especial conforme a las propiedades del SFRC se ha introducido, basado en pruebas de flexión según DIN 1048 para demostrar el comportamiento de fisuración y la impermeabilidad de este concreto (Maidl & Dietrich, 1992).

Las metodologías de diseño y construcción de túneles falsos han evolucionado significativamente, incorporando técnicas avanzadas como el uso de estructuras híbridas, la excavación a cara completa con sistemas de soporte de control de deformaciones y el concreto reforzado con fibras de acero. Estas técnicas no solo mejoran la eficiencia y seguridad de la construcción de túneles, sino que también permiten abordar una amplia gama de condiciones del suelo y desafíos estructurales.

Estudios geotécnicos para la estabilización de laderas

Los estudios geotécnicos para la estabilización de laderas son fundamentales para prevenir deslizamientos de tierra y garantizar la seguridad y viabilidad económica de las estructuras construidas en terrenos inclinados. La estabilidad de las laderas, tanto naturales como artificiales, depende en gran medida de las condiciones geotécnicas específicas del lugar, las cuales deben ser cuidadosamente investigadas y respetadas durante las etapas de diseño y construcción. La falta de una investigación adecuada en las etapas previas a la inversión puede comprometer la seguridad y la viabilidad económica de las laderas a lo largo de su vida útil esperada (Rupke et al., 2007).

Importancia y técnicas de estabilización de laderas

La estabilización de laderas es un aspecto esencial en la ingeniería geotécnica y estructural, ya que permite prevenir deslizamientos de tierra y diseñar estructuras más seguras. Diversos estudios han abordado la estabilización de laderas y la mitigación de deslizamientos, proporcionando métodos y técnicas para mejorar la resistencia al corte del suelo y evaluar rápidamente la estabilidad de las laderas (Ramesh, 2021). En particular, en regiones como Malasia, donde las lluvias monzónicas son frecuentes, la mayoría de los deslizamientos de tierra son inducidos por factores humanos, principalmente errores de diseño y construcción. Por lo tanto, es esencial implementar medidas correctivas y preventivas, como anclajes de roca y suelo, sistemas de drenaje y el uso de geogrietas en terraplenes (Mizal-Azzmi et al., 2011).

Desafíos en la estabilización de laderas

En algunos casos, la estabilización de laderas puede ser una tarea poco común y no rutinaria, como se observa en Letonia, donde la experiencia práctica en este campo es limitada. La solución de problemas de estabilización de laderas requiere un juicio ingenieril basado en la experiencia y la supervisión durante el proceso de investigación geotécnica (Arhipenko, 2016). Además, la estabilidad de las laderas de roca también es un tema de gran importancia, y existen métodos específicos para evaluar y mejorar la estabilidad de estas laderas, que son potencialmente peligrosas (Hoek & Bray, 1974).

Métodos numéricos y materiales innovadores

El uso de métodos numéricos, como el método de los conjuntos numéricos (NMM), ha demostrado ser eficaz para analizar la estabilidad de laderas compuestas por mezclas de suelo y roca. Estos métodos permiten predecir con alta precisión el factor de seguridad de las laderas y capturar los patrones de falla, lo que es trascendental para el diseño y la implementación de medidas de estabilización (Yang et al., 2019). Asimismo, la utilización de materiales innovadores, como el geofoam, ha mostrado ser efectiva para estabilizar laderas de arcilla blanda con capas débiles, mejorando significativamente el factor de seguridad de las laderas (Elkady & Badrawi, 2014).

Evaluación Preliminar del comportamiento de masas rocosas

Un entendimiento sólido de la estabilidad de taludes es fundamental para abordar problemas de estabilidad en carreteras y minas. Los sistemas de clasificación de masas rocosas y los métodos empíricos son herramientas esenciales utilizadas con frecuencia para una evaluación preliminar del comportamiento ingenieril de las masas rocosas (Duran y Douglas, 2000). En muchos casos estudiados, los análisis de estabilidad de taludes rocosos tienden a simplificar las características del material y sus propiedades físicas y mecánicas, siendo esta uniformización también una práctica común en el análisis de estabilidad en Perú y en otras regiones (Huang, Zhou, Ma, Niu y Wang, 2016). Esta uniformización puede aumentar la incertidumbre y plantear problemas futuros, especialmente frente a eventos sísmicos o cambios climáticos, debido a las variaciones naturales y los factores externos que afectan a las pendientes rocosas, especialmente en áreas montañosas (Pantelidis, 2009).

Aplicaciones con éxito

La estabilización de laderas y la protección contra deslizamientos son aspectos críticos en la ingeniería civil, especialmente en áreas montañosas y sísmicamente activas. Los túneles falsos, estructuras que imitan la forma de un túnel pero que no atraviesan completamente una montaña, se utilizan como una medida de protección para mitigar los riesgos asociados con deslizamientos de tierra y caídas de rocas. Este apartado revisa varios estudios de caso que abordan la estabilización de laderas y la protección contra deslizamientos utilizando diversas técnicas, incluyendo túneles falsos.

- **Estudio de Caso 1: El túnel falso El Cune**

El Túnel El Cune, ubicado en la Ruta Nacional 50 entre Bogotá y Medellín, fue construido entre 2009 y 2010 para resolver problemas de inestabilidad geológica que interrumpieron la carretera durante 10 años. Este falso túnel de dos celdas, cada una con dos carriles y bermas laterales, tiene un gálibo de 5,10 m. Su diseño innovador, propuesto por Pedelta, incluye una fila de pilotes de 1,50 m de diámetro y 28 m de profundidad, seguidos por tres filas de pilotes con vigas cabezal y bóvedas prefabricadas que distribuyen las cargas. La solera se compone de vigas transversales formando vigas tipo T para transferir las cargas del tráfico. Esta estructura ganó el premio nacional de ingeniería Julio Garavito en 2012 por su diseño innovador (Pedelta, n.d.).

- **Estudio de Caso 2: Análisis de estabilidad de laderas y medidas de protección en ingeniería de puentes y túneles en el suroeste de China**

Un estudio en el suroeste de China abordó la inestabilidad de laderas en la construcción de puentes y túneles mediante monitoreo de campo, investigaciones geológicas y simulaciones numéricas. Se instalaron muros de contención y redes de protección para interceptar posibles flujos de escombros y caídas de rocas sobre el portal del túnel (Sun et al., 2018).

- **Estudio de Caso 3: Análisis de estabilización de equilibrio de laderas alrededor de entradas de túneles**

Este estudio utilizó el método de estabilización de equilibrio rotacional para analizar laderas multilaminares alrededor de entradas de túneles. Se identificaron las caras de deslizamiento más riesgosas, proporcionando una base científica para determinar las medidas de ingeniería adecuadas (Xiao, 2001).

- **Estudio de Caso 4: Efectos de refuerzo y monitoreo de seguridad para laderas altas y empinadas**

En la estación hidroeléctrica de Suofengying, se emplearon túneles anti-cizallamiento, pilotes anti-deslizamiento y cables de anclaje para reforzar una ladera. Los túneles anti-cizallamiento fueron críticos para la estabilidad de la ladera, y se propusieron índices de monitoreo de seguridad basados en simulaciones de fallos (Lin et al., 2020).

- **Estudio de Caso 5: Influencia de la excavación de túneles gemelos en masas rocosas débiles adyacentes a laderas**

Este estudio investigó proyectos de túneles gemelos adyacentes a laderas utilizando modelos numéricos 2D y 3D. Se encontró que la ubicación de los túneles en relación con la ladera y entre sí puede mejorar la estabilidad general sin medidas especiales adicionales (Vlachopoulos et al., 2018).

- **Estudio de Caso 6: Estabilidad estática y sísmica de una ladera reforzada con dos filas de pilotes**

En Tlemcen, se utilizaron dos filas de pilotes anti-deslizamiento para estabilizar una ladera. El análisis de estabilidad bajo cargas estáticas y dinámicas demostró que esta solución es efectiva y ventajosa (Chekroun & Boumechra, 2023).

- **Estudio de Caso 6: Historias de casos de estabilización de deslizamientos usando muros de ejes perforados**

En Utah, se emplearon ejes perforados para estabilizar laderas compuestas de lutitas que se debilitan durante períodos húmedos. Esta técnica demostró ser efectiva para prevenir deslizamientos y proteger infraestructuras cercanas (Rollins & Rollins, 1992).

Estudios geotécnicos y geofísicos de la vía Alóag – Santo Domingo

Para la estabilización de laderas en el proyecto de ampliación a cuatro carriles de la carretera Alóag-Santo Domingo, se realizaron estudios geotécnicos detallados, incluyendo prospección geofísica mediante sísmica de refracción y resistividad eléctrica. Estos estudios fueron esenciales para comprender las condiciones del subsuelo y diseñar las medidas de estabilización adecuadas. La sísmica de refracción se utilizó para describir y definir la litología a profundidad, llevando a cabo varios perfiles sísmicos en las áreas críticas del proyecto. En el sector de Chiguilpe, se ejecutaron dos perfiles de 60 metros y uno de 120 metros para recibir las ondas longitudinales (Vp) y transversales (Vs). La interpretación de los datos de campo incluyó la elaboración de dromocrónicas, que permitieron determinar los espesores de las capas y sus velocidades, correlacionándolas con la geología local e identificando materiales como limos arenosos, coluviones y rocas volcánicas.

Análisis de Estabilidad de Taludes

El análisis de estabilidad de los taludes en los puntos más conflictivos de la carretera Alóag-Santo Domingo se realizó mediante modelación computacional utilizando el software SLIDE v 6.0 y Phase de Rocscience. A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada talud:

Estabilidad de Taludes de Corte

Se realizó un análisis de estabilidad para los taludes de corte bajo la acción de las cargas estáticas y sísmicas a las que estarán sometidos durante su vida útil. El modelo utilizado es un modelo plástico debido a las características físico-mecánicas de los suelos encontrados. La mayoría de los suelos son material coluvial con bloques de roca y condiciones de baja humedad, subyacentes a depósitos coluviales y coluvio-aluviales con clastos métricos, que se combinan lateralmente con la presencia de roca alterada, finalizando en roca volcánica fracturada como andesitas.

Parámetros Geotécnicos

Los parámetros geotécnicos considerados para los materiales del corte fueron obtenidos mediante investigaciones de campo y laboratorio, determinando el ángulo de fricción interna del suelo y la cohesión. Se clasificó el suelo mediante límites plásticos y líquidos, así como el contenido de humedad, correlacionado con las velocidades de la sísmica de refracción y de la resistividad eléctrica. Con las muestras inalteradas recuperadas mediante bloques cúbicos, se realizaron ensayos de compresión triaxial UU (ASTM D-2850) para determinar las propiedades de resistencia al corte de los suelos.

La caracterización de los parámetros físico-mecánicos se complementó con datos de RMR y perforaciones de los puentes cercanos a los sitios analizados. Además, se consideraron las características mecánicas de las rocas indicadas en el informe geológico.

Método de Análisis

El análisis de estabilidad se realizó utilizando el programa SLIDE v 6.0 y Phase de Rocscience, que determinan el factor de seguridad (F.S.) de las potenciales superficies de falla mediante el método de equilibrio límite y por máximo esfuerzo y deformación trabajando con elementos finitos. Se utilizó un mecanismo de falla circular para analizar las secciones más críticas mediante el método de Janbu Generalizado, que satisface los equilibrios globales de momentos y fuerzas, siendo especialmente útil para suelos rocosos.

Tabla 1 Análisis de Estabilidad de Taludes

Talud	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad dinámico	Recomendación
72+100	1.64	1.23	Inclinación 1H:3V con bermas cada 10 m de altura y 3.0 m de ancho
72+305	13.99	11.07	Inclinación 1H:3V con bermas cada 10 m de altura y 3.0 m de ancho, y en la berma final hacer 0.5H:1V o construir túneles falsos
77+840	3.56	2.33	Mantener el talud natural con protección contra erosión o construir túneles falsos
77+896	1.84	1.57	Inclinación 1.5H:1V con protección contra la erosión o construir túneles falsos
91+460	1.32	1.04	Inclinación 1H:3V con bermas cada 10 m de altura y 3.0 m de ancho, y en la berma final hacer 0.5H:1V
91+880	1.53	1.13	Inclinación 1.5H:1V con bermas cada 10 m de altura y 3.0 m de ancho

Esquema Estático – Método Janbu

El método Janbu es un método general de análisis de estabilidad que satisface los equilibrios globales de momentos y fuerzas. Las fuerzas actuando en bloques individuales incluyen:

W : Peso del bloque.

$K_h \cdot W$: Fuerza de inercia horizontal durante el sismo.

N : Fuerza normal en la superficie de deslizamiento.

T_i : Fuerza de corte en la superficie de deslizamiento.

$E_{i,i+1}$: Fuerzas ejercidas por cuerpos vecinos.

$F_{xi,yi}$: Fuerzas horizontales y verticales actuando en el bloque.

M_{1i} : Momento desde las fuerzas $F_{xi,yi}$

U : Presión de poro resultante.

Fórmulas utilizadas

Las fórmulas para determinar el ángulo de fricción interna y la cohesión son fundamentales para el análisis de estabilidad de taludes. A continuación, se presentan las fórmulas específicas utilizadas en el estudio:

1. Ángulo de Fricción Interna (ϕ):

$$\phi = 27.1 + 0.3N_{corr} - 0.0054N_{corr}^2$$

$$\phi = \sqrt{20 N_{corr} + 20}$$
2. Cohesión (C):

$$C=KN$$

$$C=29N^{0.72}$$

$$C=0.60N$$

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de taludes específicos.

Talud	Profundidad (m)	ϕ (°)	C (kPa)
72+010	5.0	$27.1+0.3N_{corr}-0.0054N_{corr}^2$	KN
72+040	5.0	$27.1+0.3N_{corr}-0.0054N_{corr}^2$	KN
72+820	5.0	$27.1+0.3N_{corr}-0.0054N_{corr}^2$	KN
77+880	6.0	$27.1+0.3N_{corr}-0.0054N_{corr}^2$	KN

Estos análisis y recomendaciones proporcionan una base sólida para la implementación de medidas de estabilización en los puntos más críticos del tramo Unión del Toachi - Santo Domingo.

Condiciones que Favorecen la Inestabilidad de Taludes

Existen varias condiciones que favorecen la inestabilidad de un talud, siendo las principales:

- Agrietamiento o fracturas en las caras de los taludes o en la conformación geológica.
- Pendientes empinadas o en relieves topográficos altos.
- Taludes conformados de materiales sueltos.
- Taludes con gran contenido de agua retenida.
- Taludes sin vegetación expuestos a la intemperie.
- Cursos de agua superficiales sin encauzamiento.
- Meteorización superficial de la roca.

Estas condiciones, cuando se presentan combinadas, aumentan significativamente la probabilidad de falla del talud.

Geología del Área de Implantación

La geología del área de implantación del puente sobre el río Toachi es esencial para el diseño y la segmentación de túneles falsos destinados a la estabilización de laderas. Esta región se caracteriza por una variedad de unidades litológicas pertenecientes al Cuaternario, Pleistoceno y Cretáceo, incluyendo depósitos coluviales, aluviales y formaciones volcánicas. Los escombros artificiales, depósitos coluviales y terrazas aluviales forman una mezcla heterogénea de materiales granulares y finos, que presentan diferentes grados de compacidad y resistencia. A continuación, se presentan los siguientes resultados geofísicos:

Tabla 3. Descripción de unidades litológicas.

Unidad Litológica	Descripción
Escombros artificiales	Mezcla heterogénea de escombros y materiales de construcción, sueltos a ligeramente compactados.
Aluviales de cauce	Cantos rodados con mínimas cantidades de gravas y arenas, y esporádicos bloques de roca volcánica.
Depósitos coluviales	Bloques y cantos rodados con finos, sueltos a poco compactados.
Terrazas aluviales	Bloques de roca y cantos rodados con finos, mediana a baja compacidad, espesores < 2m.
Formación zarapullo	Cantos rodados con gravas en matriz arenosa, altamente compactado.
Formación macuchi	Rocas volcánicas tipo andesitas y aglomerados volcánicos, alta resistencia, baja meteorización.

Tabla 4. Equipos utilizados.

Nombre	Especificación	Fabricante	Cantidad
Sismógrafo	ES-3000	Geometrics	1
Geófonos verticales	14 Hz ondas P	Geometrics	12
Geófonos horizontales	4.5 Hz ondas S	Geometrics	12
Cable geófonos	12 tomas c/10m	Geometrics	1
Laptop	HP	-	1
Batería	12V 20A	Stinger	1
Equipo de comunicación	MJ270R	Motorola	4

Tabla 5. Ubicación y longitud

Línea sísmica	Localización	Ubicación UTM	Longitud
LS-A (Vp)	Estribo Margen derecha	Inicio: 9965016mN-727712mE	60 m
PS-1 (Vs)		Fin: 9964962mN-727706mE	60 m
LS-B (Vp)	Pila Margen derecha	Inicio: 9964996mN-727660mE	60 m
PS-2 (Vs)		Fin: 9964940mN-727675mE	60 m
LS-C (Vp)	Pila Margen izquierda	Inicio: 9964943mN-727608mE	32.50 m
PS-3 (Vs)		Fin: 9964950mN-727580mE	32.50 m
LS-D (Vp)	Estribo Margen izquierda	Inicio: 9964950mN-27579mE	60 m
PS-4 (Vs)		Fin: 9964966mN-727524mE	60 m

Tabla 6. Velocidades sísmicas y tipos de material.

Margen y Posición	Capa	Velocidad Sísmica (Vp) m/s	Velocidad Sísmica (Vs) m/s	Espesores (m)	Tipo de Material Estimado
Margen Derecha: Estribo	1	447	225	3.00 – 4.30	Escombros de construcción, bloques, cantos rodados con finos
	2	3611	1211	desconoci do	Rocas volcánicas andesíticas, medianamente fracturadas
Margen Derecha: Pila	1	206	114	0.90 – 1.70	Terraza aluvial de cantos rodados, gravas y arenas limosas, sueltas

	2	4075	1273	desconoci do	Rocas volcánicas andesíticas, mediana a poco fracturadas
Margen Izquierda: Pila	1	300	140	0.00 – 0.20	Capa fina de suelo limo arenoso, con clastos de roca; sueltos
	2	3900	1344	desconoci do	Rocas volcánicas andesíticas, mediana a poco fracturadas
Margen Izquierda: Estribo	1	360	165	0.90 – 6.60	Material de bote, mezcla de partículas de roca, cantos rodados con finos
	2	3600	1161	desconoci do	Rocas volcánicas andesíticas, medianamente fracturadas

Tabla 7. Determinación de parámetros del suelo y capacidad de carga.

Margen y posición	Espesores (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (gr/cm ³)	g (m/seg ²)	E _{din} (kg/cm ²)	E _{est} (kg/cm ²)	E _{def} (kg/cm ²)	q adm (kg/cm ²)
Margen Derecha: Estribo	3.00 – 4.30	447	225	0.33	1.82	9.80	2502	1005	115	1.00
	desconocido	3611	1211	0.44	2.41	9.80	103664	70394	3237	7.00
Margen Derecha: Pila	0.90 – 1.70	206	114	0.28	1.72	9.80	582	190	79	0.50
	desconocido	4075	1273	0.45	2.47	9.80	118006	81611	3742	7.50
Margen Izquierda: Pila	0.00 – 0.20	300	140	0.36	1.76	9.80	959	336	85	0.60
	desconocido	3900	1344	0.43	2.45	9.80	129216	90514	4143	7.90
Margen Izquierda: Estribo	0.90 – 6.60	360	165	0.37	1.79	9.80	1357	500	93	0.70
	desconocido	3600	1161	0.44	2.41	9.80	95579	64155	2957	6.70

En base al análisis de los resultados, se determinó que los parámetros geotécnicos y capacidades de carga permiten diseñar túneles falsos que soporten adecuadamente las condiciones del subsuelo, asegurando la estabilidad y funcionalidad de la infraestructura en la carretera Alóag-Santo Domingo. Estas estrategias asegurarán la estabilidad de los taludes y la integridad de la infraestructura vial, minimizando los riesgos de deslizamientos y daños asociados.

Ventajas y desventajas en técnicas de estabilización con túneles falsos.

Las distintas metodologías y técnicas de estabilización de laderas mediante túneles falsos ofrecen varias ventajas y desventajas. Entre las ventajas, el método MMST (Método de Estructura Híbrida) proporciona una

estructura robusta y flexible, capaz de manejar grandes deformaciones, lo cual es trascendental en terrenos con alta variabilidad geotécnica como los encontrados en la vía Alóag-Santo Domingo. La excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones permite una mejor gestión de las deformaciones en terrenos inestables, garantizando la estabilidad durante y después de la construcción. El uso de concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) mejora la durabilidad y la impermeabilidad del túnel, haciéndolo adecuado para áreas con alta presión de agua y variabilidad hidrogeológica.

Sin embargo, estas técnicas también presentan desventajas. El método MMST puede ser costoso y complejo de implementar debido a la necesidad de materiales y mano de obra especializada. La excavación a cara completa requiere un control riguroso y puede enfrentar desafíos en condiciones geotécnicas extremadamente adversas. El SFRC, aunque eficiente, puede tener un costo inicial más alto comparado con otros materiales. En el caso específico de la vía Alóag-Santo Domingo, la integración de estas técnicas permitió diseñar soluciones específicas y efectivas para mitigar los riesgos de deslizamientos, aunque se enfrentaron desafíos significativos como la variabilidad de las condiciones del terreno y los costos asociados.

Aplicación de metodologías de diseño y construcción de túneles falsos

En base a los estudios geotécnicos realizados para la vía Alóag-Santo Domingo, las metodologías de diseño y construcción de túneles falsos deben seleccionarse y aplicarse según las características geológicas y las necesidades específicas de estabilización de las laderas en esta región. El método MMST (Método de Estructura Híbrida) es adecuado para túneles de gran tamaño con secciones transversales rectangulares, proporcionando la resistencia y flexibilidad necesarias para soportar las cargas del terreno y prevenir deslizamientos.

Esta estructura híbrida, compuesta de concreto reforzado y acero, es ventajosa en terrenos con variabilidad geotécnica, como los encontrados en el sector de Chiguilpe, y es esencial para manejar grandes deformaciones y ofrecer un soporte sólido, garantizando la estabilidad de las laderas. En áreas donde las condiciones del suelo son difíciles y se requieren medidas adicionales para controlar las deformaciones, se recomienda la excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones, que se divide en el "método pesado" y el "método ligero" dependiendo de las condiciones del terreno.

Además, el uso de concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) es ideal para la construcción de túneles falsos con revestimientos permanentes de concreto impermeable, proporcionando una solución duradera y resistente a las condiciones adversas del subsuelo. La implementación de estos túneles, utilizando metodologías avanzadas, mejorará la estabilidad y seguridad de las laderas, garantizando la durabilidad y eficiencia de la infraestructura vial y mitigando los riesgos de deslizamientos.

Características generales del diseño de un túnel falso

Las características generales del diseño de un túnel falso deben ser claramente descritas, tomando en cuenta las condiciones geotécnicas específicas del proyecto de la carretera Alóag-Santo Domingo. Basado en los estudios y metodologías discutidas, aquí se presentan las características principales:

1. Estructura híbrida de concreto reforzado y acero

Un túnel falso típico utiliza una estructura híbrida compuesta por concreto reforzado y perfiles de acero. Esta combinación proporciona la resistencia y flexibilidad necesarias para soportar las cargas del terreno y los movimientos diferenciales. En terrenos con alta variabilidad geotécnica, como los encontrados en la vía Alóag-Santo Domingo, esta estructura híbrida asegura la estabilidad y durabilidad del túnel. Para las áreas identificadas con formaciones de coluvión y rocas volcánicas, una estructura híbrida puede manejar eficientemente las deformaciones y las cargas aplicadas, mitigando el riesgo de deslizamientos.

2. Excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones

Esta técnica implica la excavación a cara completa reforzada sistemáticamente con elementos de fibra de vidrio y otros materiales para controlar las deformaciones del terreno. El método se adapta en dos enfoques: "método pesado", que restringe las deformaciones, y "método ligero", que permite ciertas deformaciones para reducir las tensiones en los revestimientos primarios y finales. En sectores con grandes deformaciones, como se observó en algunas partes del proyecto, el uso de excavación a cara completa combinada con sistemas de soporte de control de deformaciones es trascendental. Esta técnica asegura que las deformaciones sean manejadas adecuadamente, protegiendo la estructura del túnel.

3. Revestimiento de Concreto Reforzado con Fibras de Acero (SFRC)

El uso de concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) permite la construcción de revestimientos permanentes de concreto impermeable sin necesidad de refuerzo con barras de acero. Este tipo de concreto tiene la capacidad de reaccionar plásticamente a los momentos de flexión, lo que mejora su capacidad para manejar las tensiones internas y externas. En áreas con alta presión de agua y variabilidad hidrogeológica, el SFRC proporciona una solución eficaz para mantener la integridad del túnel falso, asegurando la impermeabilidad y la resistencia a las condiciones adversas del subsuelo.

4. Sistemas de drenaje y control de aguas subterráneas

Un componente significativo del diseño de túneles falsos es la implementación de sistemas de drenaje eficientes para controlar el flujo de aguas subterráneas y superficiales. Esto incluye la instalación de drenes longitudinales y transversales, así como sistemas de bombeo para evitar la acumulación de agua que pueda comprometer la estabilidad del túnel. Los estudios de resistividad eléctrica identificaron variabilidad hidrogeológica en el subsuelo. Implementar sistemas de drenaje adecuados es esencial para manejar estas condiciones y prevenir problemas relacionados con la acumulación de agua.

5. Monitoreo continuo de la estabilidad

La implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo, como inclinómetros y piezómetros, es fundamental para garantizar la estabilidad continua del túnel falso. Estos instrumentos permiten el monitoreo en tiempo real de los movimientos del terreno y los niveles de agua, facilitando una respuesta rápida ante cualquier cambio que pueda indicar problemas de estabilidad. Para la vía Alóag-Santo Domingo, el monitoreo continuo es vital para asegurar la longevidad y seguridad del túnel falso, permitiendo ajustes y mantenimientos preventivos basados en datos reales.

Condiciones geotécnicas y climáticas para la eficacia de túneles falsos

- **Tipos de Suelo**

Los estudios geotécnicos realizados en la carretera Alóag-Santo Domingo identificaron varios tipos de suelo y materiales geológicos que son trascendentales para la estabilización de laderas mediante túneles falsos. Los suelos coluviales, con un alto contenido de matriz arenosa y limo, fueron predominantemente identificados en las áreas de estudio. Estos materiales, aunque compactos en algunas zonas, presentan alta susceptibilidad a la erosión y deslizamientos en presencia de escorrentía hídrica. Además, se encontraron formaciones de rocas volcánicas y andesitas, que, aunque proporcionan una mayor capacidad de carga, también requieren técnicas específicas de estabilización debido a su fracturamiento y variabilidad en el contenido de humedad.

- **Clima**

El clima en la región de la carretera Alóag-Santo Domingo se caracteriza por altas precipitaciones, especialmente durante la temporada de lluvias. Este factor incrementa significativamente el riesgo de deslizamientos y requiere soluciones de estabilización robustas. Las lluvias monzónicas son frecuentes y contribuyen a la saturación del suelo y a la generación de escorrentía superficial, lo que aumenta la presión hidrostática en las laderas y la probabilidad de fallas geotécnicas.

- **Topografía**

La topografía de la vía Alóag-Santo Domingo presenta pendientes pronunciadas y una geografía montañosa que añade complejidad a los esfuerzos de estabilización. Las pendientes empinadas facilitan el movimiento de masas de tierra y requieren un diseño exacto de túneles falsos para desviar el material deslizado sin afectar la carretera subyacente. La variabilidad en la inclinación y la presencia de múltiples capas geológicas con diferentes propiedades mecánicas también influyen en la selección de técnicas de estabilización adecuadas.

Segmentación de túneles falsos basado en los estudios geotécnicos y geofísicos

Para la estabilización de laderas en el proyecto de ampliación a cuatro carriles de la carretera Alóag-Santo Domingo, se realizaron estudios geotécnicos detallados, incluyendo prospección geofísica mediante sísmica de refracción y resistividad eléctrica. Estos estudios fueron esenciales para comprender las condiciones del subsuelo y diseñar las medidas de estabilización adecuadas. La sísmica de refracción se utilizó para describir y definir la litología a profundidad, llevando a cabo varios perfiles sísmicos en las áreas críticas del proyecto. En el sector de Chiguilpe, se ejecutaron dos perfiles de 60 metros y uno de 120 metros para recibir las ondas longitudinales (V_p) y transversales (V_s). La interpretación de los datos de campo incluyó la elaboración de dromocrónicas, que permitieron determinar los espesores de las capas y sus velocidades, correlacionándolas con la geología local e identificando materiales como limos arenosos, coluviones y rocas volcánicas.

El método de resistividad eléctrica se utilizó para investigar las características geoelectricas del subsuelo mediante sondeos eléctricos verticales (SEVs) en varios puntos del proyecto. Este método permitió determinar la resistividad aparente del subsuelo e identificar diferentes capas geológicas, como materiales coluviales, depósitos aluviales y rocas volcánicas con variaciones en su contenido de humedad. Los datos obtenidos de los SEVs fueron analizados para construir cortes geofísicos y realizar un análisis hidrogeológico de los sitios estudiados.

Beneficios de los túneles falsos

Los túneles falsos proporcionan múltiples beneficios en el contexto de la estabilización de laderas para la carretera Alóag-Santo Domingo, basándose en la información geotécnica y geofísica obtenida:

- **Desviación de material deslizado:** Los túneles falsos desvían el material deslizado sin afectar la carretera subyacente, protegiendo la infraestructura vial de daños directos causados por deslizamientos.
- **Adaptabilidad a condiciones geotécnicas complejas:** La caracterización detallada del subsuelo mediante sísmica de refracción y resistividad eléctrica permite diseñar túneles falsos adaptados a las condiciones geotécnicas específicas, asegurando una estabilidad robusta en áreas con alta susceptibilidad geotécnica y climática.
- **Reducción de riesgos geotécnicos:** La implementación de túneles falsos reduce significativamente los riesgos de deslizamientos, especialmente en áreas con materiales coluviales y roca volcánica fracturada. Los estudios han mostrado que estos túneles pueden soportar adecuadamente las cargas estáticas y dinámicas, proporcionando un factor de seguridad adecuado.
- **Mejora de la seguridad vial:** Los túneles falsos garantizan la continuidad y seguridad del tráfico, protegiendo a los usuarios de la carretera de posibles caídas de rocas y deslizamientos de tierra.
- **Tecnologías de monitoreo:** La integración de tecnologías avanzadas de monitoreo asegura la estabilidad continua de las laderas, permitiendo una intervención rápida y eficaz en caso de detectar movimientos inusuales o riesgos inminentes.

Parámetros geotécnicos y capacidad de carga

Se realizaron estudios geotécnicos detallados en el área del puente sobre el río Toachi, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 8. Parámetros geotécnicos y capacidad de carga en el área de implantación.

Margen	Localización	Espesores (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	μ	γ (gr/cm ³)	Edin (kg/cm ²)	Eest (kg/cm ²)	Edef (kg/cm ²)	q adm (kg/cm ²)
Derecha	Estribo	3.00 – 4.30	447	225	0.33	1.82	2502	1005	115	1.00
		desconocido	3611	1211	0.44	2.41	103664	70394	3237	7.00
Derecha	Pila	0.90 – 1.70	206	114	0.28	1.72	582	190	79	0.50
		desconocido	4075	1273	0.45	2.47	118006	81611	3742	7.50
Izquierda	Pila	0.00 – 0.20	300	140	0.36	1.76	959	336	85	0.60
		desconocido	3900	1344	0.43	2.45	129216	90514	4143	7.90
Izquierda	Estribo	0.90 – 6.60	360	165	0.37	1.79	1357	500	93	0.70
		desconocido	3600	1161	0.44	2.41	95579	64155	2957	6.70

En base al análisis de los resultados analizados, se determinó que los parámetros geotécnicos y capacidades de carga permiten diseñar túneles falsos que soporten adecuadamente las condiciones del subsuelo, asegurando la estabilidad y funcionalidad de la infraestructura en la carretera Alóag-Santo Domingo. Estas

estrategias asegurarán la estabilidad de los taludes y la integridad de la infraestructura vial, minimizando los riesgos de deslizamientos y daños asociados.

Efectividad de utilización de túneles falsos en la vía Alóag-Santo Domingo

La implementación de túneles falsos en la vía Alóag-Santo Domingo ha demostrado ser altamente efectiva para la estabilización de laderas y la mitigación de deslizamientos, basándose en estudios geotécnicos y geofísicos detallados. Estos estudios, incluyendo prospección geofísica mediante sísmica de refracción y resistividad eléctrica, permitieron una comprensión precisa de las condiciones del subsuelo, identificando materiales como limos arenosos, coluviones y rocas volcánicas. La utilización de metodologías avanzadas como el método MMST (Método de Estructura Híbrida), la excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones y el concreto reforzado con fibras de acero (SFRC) proporcionó soluciones robustas y adaptadas a las condiciones geotécnicas específicas, garantizando la estabilidad y seguridad de las laderas. Los túneles falsos desvían el material deslizado sin afectar la carretera, mejoran la seguridad vial y aseguran la durabilidad de la infraestructura mediante un diseño eficaz y tecnologías de monitoreo continuo.

Estas metodologías no solo mejoran la estabilidad y seguridad de las laderas, sino que también permiten abordar una amplia gama de condiciones del suelo y desafíos estructurales. El método MMST ofrece una estructura robusta y flexible para manejar grandes deformaciones, mientras que la excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones permite una mejor gestión de las deformaciones en terrenos inestables. El uso de SFRC proporciona una solución duradera y resistente a las condiciones adversas del subsuelo, siendo especialmente útil en áreas con alta presión de agua y variabilidad hidrogeológica. En resumen, los túneles falsos representan una estrategia efectiva para mitigar riesgos geotécnicos y asegurar la funcionalidad y seguridad de la infraestructura vial en la vía Alóag-Santo Domingo.

Conclusiones

La implementación de túneles falsos en la vía Alóag-Santo Domingo ha demostrado ser una solución efectiva para la estabilización de laderas y la mitigación de deslizamientos, basada en estudios geotécnicos y geofísicos detallados. Estos estudios, que incluyeron prospección geofísica mediante sísmica de refracción y resistividad eléctrica, permitieron obtener una caracterización precisa del subsuelo, identificando materiales críticos como limos arenosos, coluviones y rocas volcánicas. Esta información es esencial para el diseño de medidas de estabilización adecuadas que aseguren la estabilidad y seguridad de las laderas.

Las metodologías avanzadas aplicadas, como el método MMST (Método de Estructura Híbrida), la excavación a cara completa con soporte de control de deformaciones y el concreto reforzado con fibras de acero (SFRC), proporcionaron soluciones robustas y adaptadas a las condiciones geotécnicas específicas del proyecto. Estas técnicas han demostrado ser efectivas en la mejora de la durabilidad y seguridad de la infraestructura vial, manejando adecuadamente las grandes deformaciones y ofreciendo un soporte sólido que garantiza la estabilidad a largo plazo de las laderas.

La utilización de túneles falsos no solo mejora la seguridad vial al desviar el material deslizado sin afectar la carretera subyacente, sino que también proporciona una infraestructura más resiliente frente a las condiciones geotécnicas complejas y adversas. Además, la integración de tecnologías de monitoreo continuo ha sido

crucial para mantener la estabilidad de las laderas, permitiendo una intervención rápida y eficaz en caso de detectar movimientos inusuales o riesgos inminentes.

En conclusión, la implementación de túneles falsos en la vía Alóag-Santo Domingo se lograría minimizar los riesgos de deslizamientos y daños asociados, asegurando la estabilidad de los taludes y la integridad de la infraestructura vial. Estas estrategias han demostrado ser una solución avanzada y segura para los desafíos geotécnicos presentes en la región. Por ejemplo, en el tramo 72+305, se recomienda una inclinación de 1H:3V con bermas cada 10 metros de altura y 3.0 metros de ancho, y en la berma final hacer 0.5H:1V. En los tramos 77+840 y 77+896, se sugiere mantener el talud natural con protección contra la erosión o construir túneles falsos para asegurar la estabilidad. En el estudio realizado se ha demostrado que la implementación de estas medidas puede ser efectiva para manejar grandes deformaciones y asegurar la integridad de la infraestructura vial, proporcionando una infraestructura más resiliente frente a condiciones geotécnicas adversas.

Referencias

- Arhipenko, R. (2016). Additional Geotechnical Investigation Task for Slope Stabilization Project at Regional Road P130 Līgas – Kandava – Veģi, km 14.00 – 14.20, Latvia. <https://doi.org/10.3846/13BSGC.2016.045>
- Azadi, M., Ghasemi, S. H., Mohammadi, M., Azadi, M., Ghasemi, S. H., & Mohammadi, M. (2020). Geomechanics and Engineering. *Geomechanics and Engineering*, 22(5), 433. <https://doi.org/10.12989/GAE.2020.22.5.433>
- Barla, G. (2016). Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8, 294–303. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2015.12.003>
- Chekroun, L. E.-H., & Boumechra, N. (2023). Static and Seismic Stability of a Slope Reinforced with Two Rows of Piles. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. <https://doi.org/10.48084/etasr.5462>
- El-kady, M., & Badrawi, E. (2014). Effect of Geofoam on Slope Stabilizing. 10, 1–11. <https://doi.org/10.21608/ICCAE.2014.44094>
- Hoek, E., & Bray, J. (1974). Rock slope engineering. <https://doi.org/10.4324/9781315154039>
- Lin, C., Li, T., Zhao, L., Zhang, Z., Lin, C., Liu, X., & Niu, Z. (2020). Reinforcement effects and safety monitoring index for high steep slopes: A case study in China. *Engineering Geology*, 279, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105861>
- Maidl, B., & Dietrich, J. (1992). VERIFICATION OF SERVICEABILITY FOR STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE IN TUNNELLING. *Structural Engineering International*, 2, 114–117. <https://doi.org/10.2749/101686692780615941>
- Mejía, M. V., & González, S. M. (2020). Campaña de socialización, de los resultados de la investigación sobre deslizamientos de tierra, para las comunidades afectadas del municipio de Timaná, Huila. Universidad Santo Tomas.

- Mizal-Azzmi, N., Mohd-Noor, N., & Jamaludin, N. (2011). Geotechnical Approaches for Slope Stabilization in Residential Area. *Procedia Engineering*, 20, 474–482. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.11.190>
- Mori, K., Uchiumi, K., Abe, Y., & Yoshifumi, H. (2002). Development of Design Method for Huge Underground Tunnel with Hybrid Structure. 12, 583–588. <https://doi.org/10.11532/JOURNALTE1991.12.583>
- Pedelta. (n.d.). Falso Túnel El Cune.
- Pincay Baque, M. A. (2023). Estimación de riesgo por deslizamiento en la parroquia Noboa, 24 de Mayo, Manabí. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*. ISSN 2602-8166, 7(1), 103–118. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v7.n1.2023.708>
- Ramesh, G. (2021). Slope and Landslide Stabilization: A Review. 1, 13–16. <https://doi.org/10.35940/IJSE.A1304.111221>
- Reyes, A., & Martínez, M. (2005). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TUNELES FALSOS PARA EL CONTROL DE CAIDAS DE ROCA. <https://docplayer.es/21790222-Diseno-y-construccion-de-tuneles-falsos-para-el-control-de-caidas-de-roca.html>
- Rollins, K., & Rollins, R. L. (1992). CASE HISTORIES OF LANDSLIDE STABILIZATION USING DRILLED-SHAFT WALLS. *Transportation Research Record*. <https://consensus.app/papers/case-histories-landslide-stabilization-using-rollins/6af7c08a07fd51b784df861f1dcb0a6d/>
- Rosero, L. V., Pinto, M. Y. R., Perea, Z. A., Hernández, L., Vargas, D. C. R., Farfán, F. J. R., Suarez, G. D. R., Piraban, A. C. C., & Barreto, C. L. A. (2017). Factores geológicos e ingenieriles relacionados al origen, evolución y control del deslizamiento de tierra en Timaná, Huila – Colombia. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:228311168>
- Rupke, J., Huisman, M., & Kruse, H. (2007). Stability of man-made slopes. *Engineering Geology*, 91, 16–24. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2006.12.009>
- Sun, S., Li, S., Li, L., Shi, S., Wang, J., Hu, J., & Hu, C. (2018). Slope stability analysis and protection measures in bridge and tunnel engineering: a practical case study from Southwestern China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3305–3321. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1362-y>
- Vlachopoulos, N., Vazaios, I., & Madjdabadi, B. (2018). Investigation into the influence of excavation of twin-bored tunnels within weak rock masses adjacent to slopes. *Canadian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1139/CGJ-2017-0392>
- Wilson, D. W., Abbo, A. J., Sloan, S. W., & Lyamin, A. V. (2014). Undrained Stability of Dual Circular Tunnels. *International Journal of Geomechanics*, 14(1), 69–79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000288)

- Xiao, L. (2001). Equilibrium stabilization analysis of slope around tunnel entrance. China Journal of Highway and Transport. <https://consensus.app/papers/equilibrium-stabilization-analysis-slope-around-tunnel-xiao/03700b0bcfc45716b70c1b72f926140f/>
- Yang, Y., Sun, G., & Zheng, H. (2019). Stability analysis of soil-rock-mixture slopes using the numerical manifold method. Engineering Analysis With Boundary Elements, 109, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.09.020>
- Consorcio Asociación E&S. (2017). Análisis Geotécnico para la Ampliación a Cuatro Carriles de la Carretera: Aloag - Santo Domingo. Gobierno de la República del Ecuador.
- Consorcio Asociación E&S. (2017). Estudio de Estabilización de Taludes para la Ampliación a Cuatro Carriles de la Carretera: Aloag - Santo Domingo. Gobierno de la República del Ecuador.
- Consorcio Asociación E&S. (2017). Prospección Geofísica para el Talud Entre las ABS. 77+885 – 77+745 Sector Variante Alluriquín. Gobierno de la República del Ecuador.
- Consorcio Asociación E&S. (2017). Prospección Geofísica para el Talud Entre las ABS. 91+455 – 91+920 Sector Chiguilpe. Gobierno de la República del Ecuador.
- Consorcio Asociación E&S. (2017). Prospección Geofísica para el Talud Entre las ABS. 72+100 – 72+400 Sector Unión del Toachi. Gobierno de la República del Ecuador.