

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**T E S I S**

**Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la  
recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en  
la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Civil**

**Autor:**

**Bach. Yorch Brayan CONDOR MALPARTIDA**

**Asesor:**

**Dr. Hildebrando Anival CONDOR GARCÍA**

**Cerro de Pasco - Perú – 2023**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**T E S I S**

**Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la  
recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en  
la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023**

**Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:**

---

**Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL**  
**PRESIDENTE**

---

**Mg. José Germán RAMIREZ MEDRANO**  
**MIEMBRO**

---

**Mg. Pedro YARASCA CORDOVA**  
**MIEMBRO**



Universidad Nacional Daniel Alcides  
Carrión Facultad de Ingeniería  
Unidad de Investigación

### INFORME DE ORIGINALIDAD N° 142-2023-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

#### Tesis:

**Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023**

Apellidos y nombres de los tesistas

Bach. CONDOR MALPARTIDA, Yorch Brayan

Escuela de Formación Profesional  
**Ingeniería Civil**

Apellidos y nombres del Asesor

Dr. CONDOR GARCIA, Hildebrando Anival

Indici de Similitud

**4 %**

**APROBADO**

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 11 de octubre del 2023

  
UNDA UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
**Luis Villar Requies Carbajal**  
DOCTOR EN CIENCIAS - DIRECTOR

## **DEDICATORIA**

A mis padres que me impulsan día a día en el camino profesional, con su venia, a mi familia que también me han acompañado cada vez que lo necesitaba y a la persona que está a mi lado que también me impulsa en todo este camino, mi futuro.

## **AGRADECIMIENTOS**

Reconocimiento a: mis padres, familiares cercanos, docentes, personal allegado a mi quienes me apoyaron en todo este recorrido profesional, desde el inicio de la carrera hasta la culminación de la misma, siendo egresado, bachiller.

## RESUMEN

La carretera Ninacaca – Huachon, ubicada en una zona propensa a deslizamientos, ha experimentado recurrentes eventos geotécnicos que afectan la estabilidad de sus plataformas viales, generando daños y deformaciones que comprometen su funcionalidad y seguridad. Ante esta problemática, el presente proyecto de investigación se propone estudiar la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para recuperar y fortalecer las plataformas viales dañadas por deslizamientos en esta carretera durante el año 2023.

El capítulo I presenta una identificación precisa del problema de investigación, delimitando sus alcances y formulando de manera clara los objetivos generales y específicos del estudio. Asimismo, se justifica la relevancia de la investigación, destacando la importancia de abordar la problemática para mejorar la infraestructura vial y su impacto socioeconómico.

En el capítulo II, se expone el marco teórico-científico que sustenta el proyecto. Se revisan los antecedentes de estudios relacionados y se profundiza en aspectos teóricos clave, como la estabilidad de suelos, las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos, y las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles. Además, se explora el impacto económico y social de los deslizamientos en infraestructuras viales y se considera la viabilidad de implementar estas tecnologías de refuerzo.

El capítulo III describe la metodología y técnicas de investigación utilizadas para lograr los objetivos planteados. Se define el tipo y nivel de investigación, así como el método y diseño de la investigación. También se detalla la población y muestra seleccionada, junto con las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

En el capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos del trabajo de campo y se analizan los datos recopilados. Se describen los deslizamientos en la carretera y sus consecuencias económicas y sociales. Asimismo, se identifican y evalúan las

tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales dañadas, considerando su viabilidad técnica y económica.

Finalmente, en las conclusiones y recomendaciones, se sintetizan los hallazgos del proyecto y se responden a los problemas específicos planteados. Se destacan las tecnologías de refuerzo de suelos más adecuadas para la carretera Ninacaca – Huachon, enfatizando su viabilidad técnica y económica. Además, se ofrecen recomendaciones para la implementación exitosa de las soluciones propuestas, con el objetivo de mejorar la estabilidad y durabilidad de las plataformas viales, y minimizar los impactos de futuros deslizamientos.

Palabra Clave: Tecnologías de refuerzo de suelos, Deslizamientos, Plataformas viales

## **ABSTRACT**

The Ninacaca - Huachon highway, located in an area prone to landslides, has experienced recurring geotechnical events that affect the stability of its road platforms, generating damage and deformations that compromise their functionality and safety. Faced with this problem, this research project aims to study the implementation of soil reinforcement technologies to recover and strengthen the road platforms damaged by landslides on this highway during the year 2023.

Chapter I presents a precise identification of the research problem, delimiting its scope and clearly formulating the general and specific objectives of the study. Likewise, the relevance of the research is justified, highlighting the importance of addressing the problem to improve road infrastructure and its socioeconomic impact.

In chapter II, the theoretical-scientific framework that supports the project is exposed. The background of related studies is reviewed and key theoretical aspects are deepened, such as soil stability, geotechnical and geological causes of landslides, and available soil reinforcement technologies. In addition, the economic and social impact of landslides on road infrastructures is explored and the feasibility of implementing these reinforcement technologies is considered.

Chapter III describes the research methodology and techniques used to achieve the proposed objectives. The type and level of research is defined, as well as the method and design of the research. The selected population and sample are also detailed, together with the techniques and instruments for data collection and analysis.

In chapter IV, the results obtained from the field work are presented and the data collected is analyzed. Highway landslides and their economic and social consequences are described. Likewise, soil reinforcement technologies available for the recovery of damaged road platforms are identified and evaluated, considering their technical and economic feasibility.

Finally, in the conclusions and recommendations, the findings of the project are synthesized and the specific problems raised are answered. The most suitable soil reinforcement technologies for the Ninacaca - Huachon highway are highlighted, emphasizing their technical and economic feasibility. In addition, recommendations are offered for the successful implementation of the proposed solutions, with the aim of improving the stability and durability of road platforms, and minimizing the impacts of future landslides.

Keyword: Soil reinforcement technologies, Landslides, Road platforms

## INTRODUCCIÓN

En un mundo en constante desarrollo y crecimiento, la infraestructura vial juega un papel fundamental para garantizar la conectividad y el progreso socioeconómico de las comunidades. Las carreteras son arterias vitales que facilitan el transporte de personas y mercancías, promoviendo el comercio, el turismo y el acceso a servicios básicos. Sin embargo, esta infraestructura no está exenta de desafíos, y uno de los problemas recurrentes que afecta su funcionamiento y estabilidad son los deslizamientos de suelo.

La carretera Ninacaca – Huachón, ubicada en una región geográficamente compleja y de condiciones climáticas variables, ha sido testigo de deslizamientos frecuentes que han causado daños significativos en sus plataformas viales. Estos deslizamientos, causados por factores geotécnicos, geológicos y climáticos, han debilitado la estabilidad del suelo y generado deformaciones y desplazamientos en la infraestructura vial, poniendo en riesgo la seguridad de los usuarios y afectando negativamente la economía local.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo abordar este desafiante problema y proponer soluciones efectivas y sostenibles para recuperar y fortalecer las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón. El enfoque principal se centra en la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos, las cuales permitirán mejorar la estabilidad y durabilidad de la infraestructura vial, salvaguardando así la integridad de esta importante vía de comunicación.

En el Capítulo I, se llevará a cabo la identificación y determinación del problema, donde se describirá detalladamente la naturaleza de los deslizamientos en la carretera y sus impactos en las plataformas viales. Se analizarán las causas geotécnicas y geológicas de estos deslizamientos, así como las consecuencias económicas y sociales

que conllevan. Además, se establecerán los objetivos generales y específicos del proyecto, con el propósito de encaminar las acciones hacia la solución del problema.

El Capítulo II, por su parte, abordará el marco teórico-científico que sustenta este proyecto de investigación. Se revisarán antecedentes relacionados con deslizamientos en infraestructuras viales y se explorarán las bases teóricas de las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles. Esta revisión bibliográfica permitirá fundamentar las estrategias y enfoques a seguir en el desarrollo del proyecto. En el Capítulo III, se expondrá la metodología y las técnicas de investigación utilizadas para llevar a cabo el estudio. Se describirá el tipo de investigación, el nivel de análisis, el método y el diseño que se aplicarán. Asimismo, se definirán las variables e indicadores a considerar en la recolección y análisis de datos. En el Capítulo IV, se presentarán los resultados y el análisis de la información recopilada en el trabajo de campo. Se examinarán las causas y evaluaciones de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón, así como las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para su recuperación. Además, se realizará una prueba de hipótesis para evaluar la viabilidad técnica y económica de las soluciones propuestas.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones derivadas de este proyecto de investigación serán presentadas en el último capítulo. Se resumirá el alcance de las tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas y se destacará la importancia de su implementación en la carretera Ninacaca – Huachón.

## INDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
INDICE	
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	
ÍNDICE DE TABLAS	

## CAPÍTULO I

### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema .....	1
1.2. Delimitación de la investigación .....	3
1.3. Formulación del problema.....	4
1.3.1. Problema general.....	4
1.3.2. Problemas específicos .....	4
1.4. Formulación de objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	5
1.5. Justificación de la investigación .....	5
1.6. Limitaciones de la investigación.....	7

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio .....	9
2.1.1. Antecedente y pre proyecto de investigación 1 .....	9
2.1.2. Antecedente y pre proyecto de investigación 2 .....	9
2.2. Bases teóricas – científicas.....	10

2.2.1. Estabilidad de suelos y deslizamientos en carreteras: Conceptos y mecanismos.....	10
2.2.2. Tecnologías de refuerzo de suelos: Tipos, aplicaciones y consideraciones. ....	11
2.2.3. Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en carreteras... 12	
2.2.4. Evaluación de daños y deformaciones en plataformas viales afectadas por deslizamientos. ....	14
2.2.5. Impacto económico y social de los deslizamientos en infraestructuras viales. ....	15
2.2.6. Métodos de investigación geotécnica para la caracterización del suelo en carreteras. ....	17
2.2.7. Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de plataformas viales dañadas. ....	19
2.2.8. Diseño y dimensionamiento de soluciones de refuerzo de suelos para carreteras afectadas por deslizamientos.....	20
2.2.9. Evaluación de la viabilidad técnica y económica de tecnologías de refuerzo de suelos. ....	22
2.2.10. Introducción al refuerzo de suelos.....	24
2.2.11. Deslizamientos de tierra en plataformas viales .....	26
2.2.12. Tecnologías de refuerzo de suelos y su aplicabilidad.....	27
2.2.13. Impacto socioeconómico de los deslizamientos de tierra .....	28
2.2.14. Viabilidad de la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos .	30
2.3. Definición de términos básicos .....	31
2.4. Formulación de hipótesis .....	33
2.4.1. Hipótesis general .....	33
2.4.2. Hipótesis Específicas .....	33
2.5. Identificación de variables.....	34
2.5.1. Variable independiente .....	34

2.5.2. Variable dependiente .....	35
2.5.3. Variable Interviniente .....	35
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	36

### **CAPÍTULO III**

#### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

3.1. Tipo de investigación .....	39
3.2. Nivel de investigación .....	40
3.3. Métodos de investigación .....	41
3.4. Diseño de investigación .....	42
3.5. Población y muestra .....	43
3.5.1. Población .....	43
3.5.2. Muestra.....	44
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	44
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	45
3.8. Tratamiento estadístico.....	45
3.9. Orientación ética filosófica y epistémica.....	46

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1. Descripción del trabajo de campo .....	48
4.1.1. Objetivo del control de erosión de la plataforma KM 40+590 al KM 40+630 .....	48
4.1.2. Justificación de la propuesta de construcción “muro TEM TERRAGABION km 40+590 al km 40+630 .....	49
4.1.3. Descripción de los trabajos a realizar.....	50
4.1.4. Descripción del trabajo de campo .....	52
4.1.5. Análisis de Estabilidad .....	70
4.1.6. Análisis de estabilidad externa.....	74
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	75

4.2.1. Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera .	75
4.2.2. Evaluación de deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon.....	79
4.2.3. Consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachón. ....	83
4.2.4. Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales.....	88
4.2.5. Viabilidad Técnica Y Económica .....	90
4.3. Prueba de hipótesis .....	93
4.3.1. Prueba de Hipótesis 1.....	93
4.3.2. Prueba de Hipótesis 2.....	96
4.3.3. Prueba de Hipótesis 3.....	99
4.3.4. Prueba de Hipótesis 4.....	102
4.3.5. Prueba de Hipótesis 5.....	104
4.4. Discusión de resultados.....	105
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Progresiva 40+590 al km 40+630, lugar donde se evidencia la erosión y deslizamiento de la plataforma (Fuente: propio) .....	50
Ilustración 2: Malla hexagonal de terragabi3n y Geomalla uniaxial (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	51
Ilustración 3: Esquema Referencial Muro de Tierra Armada tipo TerraGabion (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	53
Ilustración 4: parámetros de Dise3o (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	55
Ilustración 5: Cajas de malla doble torsión (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	56
Ilustración 6: Tipos de Terragabion empleados en el proyecto (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	57
Ilustración 7: Geomalla Uniaxial TerraGrid (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	58
Ilustración 8: Análisis de Estabilidad Externa. Cargas Sísmicas Consideradas (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	65
Ilustración 9: Sobrecarga de Tránsito según Modos de Falla Considerados (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	71
Ilustración 10: Coeficientes Referenciales de empuje horizontal al interior del macizo de Suelo Reforzado (Fuente: método AASHTO "Simplified Method"). .....	72
Ilustración 11: Línea de Tensión Máxima (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA) .....	73
Ilustración 12: Definición de las Distintas Condiciones de Falla Consideradas .....	75
Ilustración 13: Pérdida de la plataforma por deslizamiento de talud (fuente: Propio)..	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de Diseño (Fuente: CVNH) .....	54
Tabla 2: Granulometría del Relleno Estructural.....	58
Tabla 3: Requerimiento del material de relleno (Fuente: Propio).....	59
Tabla 4: Propiedades de resistencia efectiva (Fuente: Propio).....	59
Tabla 5: Encuesta sobre los deslizamientos en la carretera.....	75
Tabla 6: Causas Geotecnicas y geológicas (Fuente: Propio).....	79
Tabla 7: Consecuencias Económicas y Sociales de los deslizamientos (Fuente: Propio) .....	83
Tabla 8: Presupuesto de solución Técnica (Fuente: CVNH) .....	84
Tabla 9: valores cuantitativos para representar las variables (Fuente Propio).....	94
Tabla 10: Resultados de análisis estadísticos, Prueba de hipótesis 1 (Fuente: Propio) .....	95
Tabla 11: Datos para Prueba de hipótesis 2 (Fuente: Propio) .....	97
Tabla 12: datos para prueba de hipótesis 3 (Fuente: Propio).....	100
Tabla 13: Datos Para prueba de hipótesis 4 (Fuente: Propio) .....	103

## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La sección de "Identificación y Determinación del Problema" en el proyecto de investigación "Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023" se refiere a la descripción y análisis detallado del problema que se busca resolver con el proyecto.

En esta sección, se identificará y definirá claramente el problema específico que enfrenta la carretera Ninacaca – Huachón debido a los deslizamientos. Esto podría incluir la descripción de los deslizamientos anteriores y los daños ocasionados en las plataformas viales, así como los riesgos asociados para la seguridad de los usuarios de la carretera.

También se abordarán aspectos como la importancia económica y social de la carretera, su relevancia para la conectividad de la región y las consecuencias negativas que los deslizamientos han tenido en el transporte y la economía local.

Además, se llevará a cabo un análisis de las posibles causas de los deslizamientos, considerando factores geotécnicos, geológicos, climáticos, entre

otros. Esto ayudará a comprender mejor la naturaleza del problema y a determinar las soluciones más adecuadas.

El problema identificado en el proyecto de investigación "Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023" es el deterioro y daño de las plataformas viales debido a deslizamientos en la mencionada carretera.

La carretera Ninacaca – Huachón ha experimentado deslizamientos recurrentes que han afectado gravemente la estabilidad y funcionalidad de las plataformas viales. Estos deslizamientos han causado daños significativos a la infraestructura vial, lo cual representa un riesgo para la seguridad de los usuarios y afecta negativamente la conectividad y la economía local.

El problema se manifiesta en forma de deslizamientos de suelo y rocas que se desprenden y se deslizan hacia las plataformas viales, generando socavaciones, deformaciones y pérdida de capacidad portante del suelo. Estos deslizamientos pueden ser desencadenados por diversas razones, como la inestabilidad geotécnica del terreno, la presencia de agua en exceso, la falta de drenaje adecuado o eventos climáticos extremos.

Como resultado, la carretera Ninacaca – Huachón enfrenta interrupciones frecuentes en su funcionamiento, poniendo en peligro la seguridad de los usuarios y causando retrasos en el transporte de personas y mercancías. Además, la infraestructura dañada requiere de continuas reparaciones y mantenimiento, lo que implica altos costos económicos y limita el desarrollo socioeconómico de la región.

Por lo tanto, el problema identificado es la necesidad de implementar tecnologías de refuerzo de suelos para recuperar y fortalecer las plataformas

viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón, con el objetivo de garantizar la estabilidad, durabilidad y seguridad de la infraestructura vial en dicha área.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

La delimitación de la investigación en el proyecto "Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023" se refiere a establecer los límites y alcance de la investigación. Estos límites pueden ser tanto geográficos como temáticos, y se definen para enfocar adecuadamente los recursos y esfuerzos del proyecto.

A continuación, se presentan algunas posibles delimitaciones para este proyecto:

1. Delimitación geográfica: El proyecto se centra específicamente en la carretera Ninacaca – Huachón, lo que implica que las investigaciones, análisis y soluciones propuestas estarán orientadas a esta área geográfica en particular. El alcance puede variar según la extensión de la carretera afectada por los deslizamientos.
2. Delimitación temporal: La investigación se realiza en el año 2023, lo que significa que los estudios y análisis se basarán en datos y condiciones disponibles durante ese período. Eventuales investigaciones o desarrollos posteriores pueden quedar fuera del alcance de este proyecto.
3. Delimitación temática: El proyecto se enfoca en el uso de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos. Esto implica que otras problemáticas o aspectos relacionados con la carretera Ninacaca – Huachón, como la construcción de nuevos tramos de carretera o mejoras en la señalización vial, pueden quedar fuera del alcance de esta investigación.

4. Delimitación presupuestaria: El proyecto estará sujeto a un presupuesto determinado, lo que puede influir en la cantidad de estudios geotécnicos, pruebas piloto u otras actividades que se pueden realizar. Las limitaciones presupuestarias pueden requerir la priorización de ciertas soluciones o tecnologías de refuerzo de suelos sobre otras.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cómo implementar tecnologías de refuerzo de suelos para recuperar las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón y cómo afectan las plataformas viales?
- ¿Cuáles son los daños y deformaciones específicas en las plataformas viales como resultado de los deslizamientos?
- ¿Cuáles son las consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos en la zona afectada y cómo se pueden minimizar?
- ¿Cuáles son las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles y cuál es la más adecuada para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón?
- ¿Cuál es la viabilidad técnica y económica de implementar las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023?

## **1.4. Formulación de objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Desarrollar un plan integral para implementar tecnologías de refuerzo de suelos que permitan recuperar y fortalecer las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023, asegurando su estabilidad y durabilidad.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Investigar y analizar las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón, y determinar su impacto en las plataformas viales.
- Evaluar y cuantificar los daños y deformaciones específicas en las plataformas viales como resultado de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón.
- Analizar las consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon, y proponer estrategias para minimizar su impacto.
- Realizar un estudio exhaustivo de las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon, y evaluar su aplicabilidad y eficacia en el contexto específico.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023, considerando los recursos disponibles y los beneficios a largo plazo.

## **1.5. Justificación de la investigación**

La justificación de la investigación en el proyecto "implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales

dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023" se refiere a la exposición de las razones y motivos que respaldan la importancia y relevancia de llevar a cabo el estudio.

A continuación, se presentan algunos puntos clave para la justificación de la investigación:

1. **Preservación de la infraestructura vial:** La carretera Ninacaca – Huachón desempeña un papel crucial en la conectividad y el transporte de la zona. La implementación de tecnologías de refuerzo de suelos permitirá recuperar las plataformas viales dañadas y preservar la infraestructura vial, asegurando la continuidad del transporte y la conectividad de la región.
2. **Mejora de la seguridad vial:** Los deslizamientos representan un riesgo para la seguridad de los usuarios de la carretera. Al implementar tecnologías de refuerzo de suelos efectivas, se reducirá el peligro de nuevos deslizamientos y se proporcionará una infraestructura vial más segura para los vehículos y los peatones.
3. **Impacto económico y social:** Los deslizamientos y los daños en la carretera tienen consecuencias negativas en la economía local, afectando el transporte de mercancías y la movilidad de las personas. La recuperación de las plataformas viales contribuirá a minimizar los impactos económicos y sociales, fomentando el desarrollo regional y mejorando la calidad de vida de la comunidad.
4. **Avance en la investigación:** El estudio sobre las causas de los deslizamientos y las tecnologías de refuerzo de suelos es un campo de investigación relevante y en constante evolución. La investigación realizada en este proyecto contribuirá al conocimiento existente, proporcionando datos y recomendaciones para futuros estudios y aplicaciones en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

5. Aplicación de soluciones sostenibles: La implementación de tecnologías de refuerzo de suelos adecuadas permitirá abordar los deslizamientos de manera eficiente y sostenible, utilizando técnicas y materiales respetuosos con el medio ambiente. Esto promoverá la preservación del entorno natural y contribuirá a la sostenibilidad de la infraestructura vial a largo plazo.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

Las limitaciones de la investigación en el proyecto "Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023" se refieren a las restricciones y condiciones que pueden influir en el alcance, la validez y la generalización de los resultados obtenidos. Algunas limitaciones comunes pueden incluir:

1. Limitaciones presupuestarias: El proyecto puede estar sujeto a restricciones financieras que podrían afectar la cantidad de recursos disponibles para llevar a cabo investigaciones exhaustivas, pruebas piloto o implementaciones a gran escala.
2. Limitaciones temporales: La investigación se lleva a cabo durante un período específico, en este caso, en el año 2023. Esto puede implicar que no se puedan tener en cuenta todos los eventos, cambios o desarrollos que ocurran después de ese año.
3. Limitaciones geográficas: El estudio se centra en la carretera Ninacaca – Huachon, lo que implica que las conclusiones y recomendaciones obtenidas pueden ser específicas para esa área geográfica y pueden no ser directamente aplicables a otras regiones o carreteras.
4. Limitaciones de acceso a datos: La disponibilidad de datos geotécnicos, geológicos y otros relevantes puede ser limitada. Esto puede afectar la precisión y la completitud de los análisis realizados en el proyecto.

5. Limitaciones de tiempo y recursos humanos: La realización de investigaciones exhaustivas, análisis detallados y pruebas piloto puede requerir un tiempo y una mano de obra significativos. Las limitaciones de tiempo y recursos humanos pueden influir en la profundidad y la extensión de la investigación llevada a cabo.
6. Limitaciones de campo: Las condiciones climáticas, la accesibilidad del sitio y otros factores pueden presentar limitaciones para llevar a cabo investigaciones de campo exhaustivas o para implementar tecnologías de refuerzo de suelos en ciertas áreas.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de estudio**

##### **2.1.1. Antecedente y pre proyecto de investigación 1**

Investigación: "Evaluation of Soil Stabilization Techniques for Roadway Slope Repair" (Evaluación de técnicas de estabilización de suelos para la reparación de taludes de carreteras), Autor: Johnson, M., & Smith, A., Año: 2018

Resumen: Este estudio investiga diversas técnicas de estabilización de suelos utilizadas para la reparación de taludes de carreteras dañados por deslizamientos. Se evaluaron diferentes métodos, como pilotes, muros de contención y geotextiles, para determinar su efectividad en la estabilización del suelo y la prevención de futuros deslizamientos. El estudio proporciona resultados y recomendaciones útiles para la selección y aplicación de tecnologías de refuerzo de suelos en la recuperación de plataformas viales afectadas.

##### **2.1.2. Antecedente y pre proyecto de investigación 2**

Investigación: "Geotechnical Investigation and Remediation Measures for Landslide-prone Roadways" (Investigación geotécnica y medidas de remedio para carreteras propensas a deslizamientos), Autor: Li, Y., Liang, Y., & Wang, Z., Año: 2019

Resumen: Este estudio se enfoca en la investigación geotécnica y las medidas de remediación aplicadas en carreteras propensas a deslizamientos. Se analizaron las causas de los deslizamientos y se investigaron diversas técnicas de refuerzo de suelos utilizadas para estabilizar las plataformas viales dañadas. Se evaluaron factores como el tipo de suelo, la topografía y las condiciones climáticas para determinar las soluciones más efectivas. El estudio ofrece recomendaciones para la selección y aplicación de tecnologías de refuerzo de suelos en carreteras afectadas por deslizamientos.

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **2.2.1. Estabilidad de suelos y deslizamientos en carreteras: Conceptos y mecanismos.**

La sección "Estabilidad de suelos y deslizamientos en carreteras: Conceptos y mecanismos" aborda los fundamentos teóricos relacionados con la estabilidad del suelo y los deslizamientos en el contexto de las carreteras. A continuación, se proporciona una explicación más detallada:

La estabilidad de suelos es un concepto fundamental en la ingeniería geotécnica que se refiere a la capacidad de un suelo para resistir las fuerzas aplicadas y mantener su integridad estructural. En el contexto de las carreteras, es esencial comprender los conceptos y los mecanismos que influyen en la estabilidad del suelo para prevenir los deslizamientos y garantizar una infraestructura vial segura y duradera.

En esta sección, se abordarán conceptos clave, como la capacidad portante del suelo, que se refiere a la resistencia del suelo a soportar cargas sin sufrir fallas o asentamientos excesivos. También se analizarán los conceptos de cohesión y ángulo de fricción interna, que describen las características de resistencia y capacidad de deformación del suelo.

Además de los conceptos básicos, se explorarán los mecanismos que pueden conducir a los deslizamientos en las carreteras. Estos mecanismos pueden incluir la inestabilidad geotécnica del suelo, la presencia de agua en exceso que reduce la cohesión y el ángulo de fricción interna, la pendiente del terreno, la erosión y otros factores ambientales.

Se examinarán también los diferentes tipos de deslizamientos que pueden ocurrir en carreteras, como los deslizamientos rotacionales y los deslizamientos traslacionales. Se explorarán los factores de desencadenamiento y las condiciones que favorecen la ocurrencia de los deslizamientos en las carreteras.

### **2.2.2. Tecnologías de refuerzo de suelos: Tipos, aplicaciones y consideraciones.**

La sección "Tecnologías de refuerzo de suelos: Tipos, aplicaciones y consideraciones" se centra en proporcionar una visión detallada de las diferentes tecnologías disponibles para el refuerzo de suelos en el contexto de la recuperación de plataformas viales dañadas. A continuación, se ofrece una explicación más extensa:

Las tecnologías de refuerzo de suelos son métodos y técnicas utilizados para mejorar la capacidad de carga, la estabilidad y la resistencia de los suelos. En el caso específico de las plataformas viales dañadas por deslizamientos, estas tecnologías desempeñan un papel fundamental en la rehabilitación y recuperación de la infraestructura vial.

En esta sección, se explorarán los diferentes tipos de tecnologías de refuerzo de suelos y se discutirán sus aplicaciones y consideraciones clave. Algunas de las tecnologías más comunes incluyen:

1. Pilotes y muros de contención: Estas tecnologías implican la instalación de elementos estructurales, como pilotes y muros, en el suelo para mejorar su

capacidad de carga y resistencia al deslizamiento. Se analizarán los diferentes tipos de pilotes (por ejemplo, pilotes de acero, pilotes de concreto) y los factores a considerar al seleccionar y diseñar estos elementos.

2. Geotextiles y georedes: Estas tecnologías involucran el uso de materiales geosintéticos, como geotextiles y georedes, para reforzar el suelo y mejorar su estabilidad. Se discutirán las diferentes aplicaciones de los geotextiles y georedes, así como los criterios de selección y diseño.
3. Inyección de resinas y grouting: Estas técnicas implican la inyección de resinas o grouting en el suelo para mejorar su cohesión, resistencia y capacidad de carga. Se abordarán los diferentes tipos de resinas y grouting disponibles y se explorarán las consideraciones relacionadas con la aplicación y los efectos en el suelo circundante.
4. Reforzamiento con suelos compactados o rellenos granulares: Estas técnicas implican la compactación o el relleno de suelos para mejorar su capacidad portante y estabilidad. Se analizarán las diferentes técnicas de compactación y relleno disponibles, así como las consideraciones de diseño y construcción.

Además de discutir los tipos de tecnologías de refuerzo de suelos, esta sección también abordará las aplicaciones específicas de cada técnica en la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos. Se explorarán las consideraciones de diseño, los requisitos de construcción y los aspectos económicos y ambientales asociados con la implementación de estas tecnologías.

### **2.2.3. Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en carreteras.**

La sección "Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en carreteras" se centra en proporcionar una explicación detallada de las causas que

contribuyen a los deslizamientos en las carreteras desde una perspectiva geotécnica y geológica. A continuación, se ofrece una descripción más extensa:

Los deslizamientos en las carreteras son fenómenos geotécnicos que ocurren cuando las capas de suelo se desplazan debido a la pérdida de estabilidad interna. Comprender las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos es fundamental para identificar y abordar los factores subyacentes que contribuyen a estos eventos.

En esta sección, se examinarán en detalle las causas geotécnicas y geológicas que pueden dar lugar a los deslizamientos en las carreteras. Algunos de los factores geotécnicos que se explorarán incluyen:

- Características del suelo: Las propiedades geotécnicas del suelo, como la cohesión, la fricción interna, la permeabilidad y la capacidad de drenaje, pueden influir en la estabilidad del suelo. Se analizará cómo diferentes tipos de suelos, como arcillas, limos o gravas, pueden presentar diferentes susceptibilidades a los deslizamientos.
- Condiciones de humedad: La presencia de agua en el suelo es uno de los principales desencadenantes de los deslizamientos. Se explorará cómo las variaciones en el contenido de agua pueden afectar la cohesión y la capacidad de soporte del suelo, y cómo las condiciones de lluvia intensa, deshielo o niveles freáticos altos pueden aumentar el riesgo de deslizamientos.
- Pendiente y geometría del terreno: La inclinación del terreno, la presencia de taludes pronunciados y la configuración de la topografía pueden influir en la estabilidad del suelo. Se analizará cómo las pendientes empinadas, los cambios abruptos en la topografía y las irregularidades geométricas pueden predisponer a los deslizamientos en las carreteras.

En cuanto a las causas geológicas, se explorarán los siguientes factores:

- Características geológicas del área: Las características geológicas subyacentes, como la presencia de fallas geológicas, capas de roca débil o discontinuidades geológicas, pueden influir en la estabilidad del suelo y aumentar el riesgo de deslizamientos.
- Procesos de erosión: Los procesos de erosión, como la erosión fluvial o la erosión costera, pueden debilitar el suelo y contribuir a los deslizamientos en las carreteras. Se examinará cómo la erosión puede exponer capas de suelo menos resistentes y alterar la estabilidad de las laderas.

#### **2.2.4. Evaluación de daños y deformaciones en plataformas viales afectadas por deslizamientos.**

La sección "Evaluación de daños y deformaciones en plataformas viales afectadas por deslizamientos" se enfoca en proporcionar una descripción detallada de los métodos y técnicas utilizados para evaluar los daños y las deformaciones en las plataformas viales que han sido afectadas por deslizamientos. A continuación, se presenta una explicación más extensa:

Cuando una plataforma vial se ve afectada por un deslizamiento, es crucial realizar una evaluación exhaustiva de los daños y las deformaciones para comprender la magnitud del problema y desarrollar las estrategias adecuadas de recuperación. Esta evaluación proporciona información valiosa que ayuda a determinar la extensión de los daños, los posibles riesgos y las medidas necesarias para la rehabilitación.

En esta sección, se analizarán los diferentes métodos y técnicas utilizados en la evaluación de daños y deformaciones en plataformas viales afectadas por deslizamientos. Algunos de los enfoques comunes incluyen:

- Inspección visual: Se realizará una inspección visual detallada de la plataforma vial afectada para identificar los daños visibles, como grietas, desplazamientos, hundimientos o cambios en la geometría de la carretera. Se registrarán y documentarán estos daños para su posterior análisis.
- Levantamiento topográfico: Se utilizarán técnicas de levantamiento topográfico, como el uso de estaciones totales o tecnologías de escaneo láser terrestre (TLS), para obtener datos precisos sobre la geometría de la plataforma vial antes y después del deslizamiento. Esto permitirá cuantificar las deformaciones y los desplazamientos ocurridos.
- Monitoreo geotécnico: Se pueden instalar instrumentos de monitoreo geotécnico, como inclinómetros, extensómetros o piezómetros, para registrar y medir los cambios en las propiedades del suelo y la presión del agua. Estos datos ayudarán a comprender mejor el comportamiento del suelo y las condiciones que contribuyen a los deslizamientos.
- Pruebas de carga: Se pueden llevar a cabo pruebas de carga en la plataforma vial para evaluar su capacidad de carga y resistencia después del deslizamiento. Esto implica la aplicación controlada de cargas para determinar la respuesta estructural de la carretera y la deformación resultante.
- Análisis geotécnico y modelado: Se utilizarán métodos de análisis geotécnico y modelado numérico para evaluar la estabilidad del suelo, identificar las zonas de mayor riesgo y simular el comportamiento de la plataforma vial bajo diferentes condiciones y escenarios.

#### **2.2.5. Impacto económico y social de los deslizamientos en infraestructuras viales.**

La sección "Impacto económico y social de los deslizamientos en infraestructuras viales" se centra en proporcionar una descripción detallada de los

efectos que los deslizamientos tienen en el ámbito económico y social, específicamente en las infraestructuras viales. A continuación, se ofrece una explicación más extensa:

Los deslizamientos en infraestructuras viales pueden tener consecuencias significativas tanto a nivel económico como social. Comprender el impacto de estos deslizamientos es esencial para evaluar la magnitud de los efectos negativos y desarrollar estrategias para minimizarlos.

En esta sección, se analizará en detalle el impacto económico y social de los deslizamientos en las infraestructuras viales. Algunos de los aspectos clave que se abordarán son:

1. Impacto económico:

- a) Costos directos: Los deslizamientos pueden ocasionar daños en la infraestructura vial, lo que implica gastos significativos para la reparación o reconstrucción de las plataformas viales afectadas. Estos costos incluyen los materiales, la mano de obra, la maquinaria y los recursos necesarios para llevar a cabo las obras de recuperación.
- b) Costos indirectos: Los deslizamientos pueden interrumpir el flujo de tráfico y el transporte de bienes y servicios, lo que puede generar pérdidas económicas. Por ejemplo, los desvíos de rutas y los retrasos en la entrega de mercancías pueden aumentar los costos logísticos para las empresas y afectar la productividad y el comercio en la región.
- c) Impacto en el turismo y la economía local: Si las infraestructuras viales dañadas son importantes para el turismo o la actividad económica local, los deslizamientos pueden afectar negativamente la llegada de visitantes y la generación de ingresos en el sector turístico y otros sectores económicos relacionados.

## 2. Impacto social:

- a) Seguridad vial: Los deslizamientos pueden representar un riesgo para la seguridad vial de los conductores y los peatones. Esto puede dar lugar a accidentes de tráfico y poner en peligro la vida de las personas.
- b) Accesibilidad y movilidad: Los deslizamientos pueden limitar o interrumpir el acceso a áreas geográficas, afectando la movilidad de la población local y dificultando el acceso a servicios básicos, como hospitales, escuelas y mercados.
- c) Calidad de vida: La falta de acceso a infraestructuras viales adecuadas puede tener un impacto negativo en la calidad de vida de las personas, al dificultar su desplazamiento diario, el acceso a servicios esenciales y las oportunidades de empleo y educación.

Es importante destacar que el impacto económico y social de los deslizamientos en las infraestructuras viales puede variar dependiendo del alcance y la gravedad del deslizamiento, así como de las características socioeconómicas de la región afectada.

### **2.2.6. Métodos de investigación geotécnica para la caracterización del suelo en carreteras.**

La sección "Métodos de investigación geotécnica para la caracterización del suelo en carreteras" se enfoca en proporcionar una descripción detallada de los métodos utilizados para investigar y caracterizar el suelo en el contexto de las carreteras. Estos métodos son fundamentales para comprender las propiedades geotécnicas del suelo y su comportamiento, lo que a su vez influye en la estabilidad y el rendimiento de las plataformas viales. A continuación, se ofrece una explicación más extensa:

En la investigación geotécnica para la caracterización del suelo en carreteras, se emplean una variedad de métodos y técnicas para obtener información precisa y confiable sobre las propiedades físicas, mecánicas y químicas del suelo. Estos datos son esenciales para el diseño y la construcción de carreteras seguras y duraderas.

En esta sección, se analizarán en detalle los métodos de investigación geotécnica más comunes utilizados en la caracterización del suelo en carreteras. Algunos de los métodos que se abordarán son:

1. Sondeos y muestreo de suelos: Los sondeos geotécnicos se realizan para obtener información sobre la composición y las capas del suelo en el sitio de la carretera. Se utilizan equipos de perforación para extraer muestras de suelo en diferentes profundidades, lo que permite analizar su composición, densidad, humedad y características geotécnicas.
2. Ensayos de laboratorio: Se llevan a cabo ensayos de laboratorio en las muestras de suelo recolectadas para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Estos ensayos incluyen la determinación de la granulometría, límites de consistencia (límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad), densidad, resistencia a la compresión, permeabilidad y otros parámetros relevantes.
3. Ensayos in situ: Los ensayos in situ se realizan directamente en el lugar donde se encuentra el suelo de la carretera. Estos ensayos incluyen el ensayo de penetración estándar (SPT), la prueba de placa de carga, el ensayo de penetración dinámica ligera (DPL), el ensayo de velocidad de onda sísmica y otros ensayos geofísicos que proporcionan información sobre la resistencia y la rigidez del suelo.
4. Análisis geotécnico y modelado: Además de los ensayos de laboratorio y los ensayos in situ, se utilizan técnicas de análisis geotécnico y modelado

numérico para comprender el comportamiento del suelo en condiciones específicas. Estos análisis incluyen la aplicación de teorías de consolidación, flujo de agua en el suelo y comportamiento de cimentaciones para predecir la respuesta del suelo ante las cargas de la carretera.

### **2.2.7. Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de plataformas viales dañadas.**

La sección "Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de plataformas viales dañadas" se enfoca en proporcionar una descripción detallada de las diferentes tecnologías que se pueden utilizar para fortalecer el suelo y recuperar las plataformas viales afectadas. Estas tecnologías desempeñan un papel crucial en la rehabilitación de las infraestructuras viales dañadas, brindando soluciones efectivas para garantizar la estabilidad y la durabilidad de las carreteras. A continuación, se ofrece una explicación más extensa:

En esta sección, se explorarán las diversas tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de plataformas viales dañadas. Estas tecnologías se pueden clasificar en diferentes categorías, como pilotes y muros de contención, geotextiles y georedes, inyección de resinas y grouting, y rellenos compactados o granulares. A continuación, se ofrece una descripción detallada de estas categorías:

- Pilotes y muros de contención: Estas tecnologías implican la instalación de elementos estructurales, como pilotes y muros, en el suelo para mejorar su capacidad de carga y resistencia al deslizamiento. Los pilotes pueden ser de acero, concreto o madera, y se insertan en el suelo para proporcionar una base estable y distribuir las cargas. Los muros de contención, por otro lado, son estructuras verticales que se construyen para mantener el suelo y prevenir desplazamientos.

- Geotextiles y georedes: Estas tecnologías involucran el uso de materiales geosintéticos, como geotextiles y georedes, para reforzar el suelo y mejorar su estabilidad. Los geotextiles son tejidos permeables que se colocan en el suelo para mejorar su resistencia y capacidad de drenaje. Las georedes, por otro lado, son estructuras tridimensionales que se utilizan para confinar y reforzar el suelo.
- Inyección de resinas y grouting: Estas técnicas implican la inyección de resinas o grouting en el suelo para mejorar su cohesión, resistencia y capacidad de carga. La inyección de resinas consiste en inyectar resinas líquidas en el suelo, que se solidifican y crean una masa cohesiva. El grouting, por otro lado, implica inyectar una suspensión de cemento o lechada en el suelo para mejorar su resistencia.
- Rellenos compactados o granulares: Estas técnicas implican la compactación o el relleno del suelo con materiales granulares para mejorar su capacidad portante y estabilidad. Se pueden utilizar agregados, grava, arena u otros materiales adecuados para rellenar espacios vacíos, mejorar la distribución de cargas y aumentar la resistencia del suelo.

#### **2.2.8. Diseño y dimensionamiento de soluciones de refuerzo de suelos para carreteras afectadas por deslizamientos.**

La sección "Diseño y dimensionamiento de soluciones de refuerzo de suelos para carreteras afectadas por deslizamientos" se enfoca en proporcionar una descripción detallada de los procesos y consideraciones involucrados en el diseño y dimensionamiento de soluciones de refuerzo de suelos para la recuperación de carreteras afectadas por deslizamientos. Estos aspectos son fundamentales para garantizar la efectividad y la seguridad de las soluciones implementadas. A continuación, se ofrece una explicación más extensa:

El diseño y dimensionamiento de soluciones de refuerzo de suelos para carreteras afectadas por deslizamientos se basa en una evaluación exhaustiva de las condiciones del sitio, las características del suelo y los factores que contribuyen al deslizamiento. Este proceso implica la selección de la tecnología de refuerzo adecuada y la determinación de los parámetros de diseño para garantizar la estabilidad y el rendimiento de las carreteras rehabilitadas.

En esta sección, se analizarán los diferentes aspectos involucrados en el diseño y dimensionamiento de soluciones de refuerzo de suelos. Algunos de los elementos clave que se abordarán son:

- Evaluación geotécnica: Se realizará una evaluación detallada de las condiciones geotécnicas del sitio, incluyendo la caracterización del suelo, la identificación de las capas y su comportamiento frente a las cargas y los factores de deslizamiento. Esto puede involucrar la recopilación de datos geotécnicos mediante sondeos, ensayos de laboratorio y ensayos in situ.
- Selección de tecnologías de refuerzo: Se seleccionarán las tecnologías de refuerzo de suelos más adecuadas para abordar las condiciones específicas del sitio y los desafíos causados por el deslizamiento. Esto implica considerar la efectividad, la disponibilidad de materiales y equipos, la viabilidad económica y las consideraciones técnicas.
- Análisis de estabilidad: Se llevará a cabo un análisis de estabilidad del suelo y de la estructura de refuerzo propuesta para evaluar su capacidad para resistir las fuerzas y prevenir futuros deslizamientos. Se pueden utilizar métodos analíticos y modelos numéricos para simular el comportamiento del suelo y verificar la estabilidad de la solución de refuerzo propuesta.
- Dimensionamiento estructural: Se determinarán los parámetros de diseño estructural, como las dimensiones de los pilotes, los muros de contención o los geotextiles, y la ubicación de los elementos de refuerzo en la plataforma

vial. Esto implica considerar las cargas de diseño, la capacidad portante del suelo y la distribución adecuada de las fuerzas para garantizar la estabilidad y la integridad de la estructura.

- Consideraciones de construcción: Se tendrán en cuenta las consideraciones relacionadas con la construcción de la solución de refuerzo, como la secuencia de construcción, los métodos de instalación y las precauciones necesarias durante el proceso de construcción. Esto garantizará una ejecución adecuada de la solución y la minimización de posibles problemas durante y después de la implementación.

### **2.2.9. Evaluación de la viabilidad técnica y económica de tecnologías de refuerzo de suelos.**

La sección "Evaluación de la viabilidad técnica y económica de tecnologías de refuerzo de suelos" se centra en proporcionar una descripción detallada de los procesos y consideraciones involucrados en la evaluación de la viabilidad técnica y económica de las tecnologías de refuerzo de suelos utilizadas en la recuperación de carreteras afectadas por deslizamientos. Estos aspectos son fundamentales para garantizar la efectividad y la sostenibilidad de las soluciones implementadas. A continuación, se ofrece una explicación más extensa:

La evaluación de la viabilidad técnica y económica de las tecnologías de refuerzo de suelos es un paso crítico en el proceso de recuperación de carreteras dañadas por deslizamientos. Implica la evaluación de las tecnologías disponibles en términos de su idoneidad para abordar los desafíos geotécnicos específicos, así como su viabilidad económica y su capacidad para cumplir con los objetivos y las restricciones del proyecto.

En esta sección, se analizarán los diferentes aspectos involucrados en la evaluación de la viabilidad técnica y económica de las tecnologías de refuerzo de suelos. Algunos de los elementos clave que se abordarán son:

1. Evaluación técnica:

- Compatibilidad con las condiciones del suelo: Se evaluará la idoneidad de las tecnologías de refuerzo de suelos en función de las características geotécnicas del suelo en la zona afectada. Esto implica considerar la cohesión, la capacidad portante, la permeabilidad y otras propiedades relevantes del suelo.
- Eficiencia en la mejora de la estabilidad: Se evaluará la capacidad de las tecnologías de refuerzo de suelos para mejorar la estabilidad del suelo y prevenir futuros deslizamientos. Se considerarán factores como la capacidad de carga, la resistencia al deslizamiento y la capacidad de deformación controlada.
- Compatibilidad con las restricciones del proyecto: Se analizará la viabilidad de las tecnologías de refuerzo de suelos en función de las restricciones específicas del proyecto, como el tiempo disponible, el acceso al sitio, la disponibilidad de materiales y equipos, y las limitaciones ambientales.
- Experiencia y disponibilidad: Se considerará la disponibilidad de expertos en la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos y la existencia de proyectos anteriores exitosos utilizando estas tecnologías.

2. Evaluación económica:

- Costos de implementación: Se realizará una evaluación de los costos asociados con la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos, incluyendo los materiales, la mano de obra, los equipos y otros gastos relacionados.
- Costos de mantenimiento y vida útil: Se considerarán los costos de mantenimiento a largo plazo y la vida útil esperada de las soluciones de refuerzo de suelos. Esto incluye los gastos de monitoreo, inspección y posibles reparaciones en el futuro.

- Beneficios económicos derivados de la solución: Se analizarán los beneficios económicos potenciales resultantes de la implementación de las tecnologías.

## **2.2.10. Introducción al refuerzo de suelos**

### **2.2.10.1. Definición y propósito del refuerzo de suelos**

El refuerzo del suelo se refiere a una serie de técnicas que se utilizan para mejorar las propiedades mecánicas del suelo, lo que permite que el suelo soporte cargas más pesadas y se mantenga estable en condiciones que normalmente causarían deslizamientos de tierra, asentamiento o colapso. Estas técnicas suelen utilizarse en ingeniería geotécnica y de construcción para fortalecer el suelo antes de la construcción de estructuras o carreteras, o para rehabilitar áreas donde el suelo ha sido dañado o debilitado (Jones, C.J.F.P., 2004).

El propósito principal del refuerzo de suelos es mejorar la resistencia al corte y la rigidez del suelo, lo que a su vez aumenta su capacidad de carga y disminuye los asentamientos diferenciales. Esto se logra utilizando diversos materiales y técnicas que, cuando se incorporan al suelo, aumentan su resistencia y estabilidad. En última instancia, el refuerzo del suelo es esencial para garantizar la seguridad, la durabilidad y la eficiencia de las estructuras construidas sobre suelos mejorados (Winter, M.G., Smith, D.M., Toll, D.G., 2000).

### **2.2.10.2. Historia y evolución del refuerzo de suelos**

El concepto de refuerzo de suelos no es nuevo y ha sido utilizado por diversas civilizaciones a lo largo de la historia. Los primeros registros históricos de su uso provienen de diversas civilizaciones antiguas, que utilizaban materiales disponibles localmente, como paja y madera, para reforzar el suelo y construir estructuras más fuertes (Jones, C.J.F.P., 2004).

A medida que avanzaba la ciencia de la ingeniería geotécnica, también lo hicieron las técnicas y los materiales utilizados para el refuerzo del suelo. En el siglo XX, con el advenimiento de la ingeniería moderna y los materiales sintéticos, las técnicas de refuerzo del suelo se volvieron más sofisticadas y efectivas. Se comenzaron a usar geosintéticos, geoceldas, anclajes de suelo y pilotes de cimentación, entre otros, para mejorar la resistencia y la estabilidad del suelo (Jones, C.J.F.P., 2011).

### **2.2.10.3. Técnicas de refuerzo de suelos**

Existen diversas técnicas para el refuerzo de suelos, y la elección de la técnica más adecuada depende en gran medida de las características específicas del suelo y del propósito del proyecto de construcción. Algunas de las técnicas más comunes incluyen:

- Geosintéticos: Los geosintéticos son materiales fabricados que se utilizan para reforzar el suelo. Esto incluye geotextiles, geomallas, geoceldas y geocompuestos. Se utilizan para funciones como separación, refuerzo, filtración, drenaje y contención (Koerner, R.M., 2012).
- Confinamiento del suelo: Esta técnica utiliza elementos de confinamiento, como geoceldas, para confinar y compactar el suelo, mejorando así su capacidad de carga (Almeida, M., Lopes, P., 2016).
- Anclajes de suelo: Los anclajes de suelo son utilizados para mejorar la estabilidad de las estructuras de retención, pendientes y cimentaciones. Los anclajes transfieren la carga de la estructura al suelo, mejorando su estabilidad (Littlejohn, G.S., Bruce, D.A., 1977).
- Inyección de suelo: La inyección de suelo implica la inyección de un material aglutinante en el suelo para aumentar su densidad y resistencia (Juran, I., Eliáš, J., 1990).

## **2.2.11. Deslizamientos de tierra en plataformas viales**

### **2.2.11.1. Definición y causas de los deslizamientos de tierra**

Los deslizamientos de tierra se definen como el movimiento hacia abajo y hacia afuera de la pendiente de materiales de la superficie terrestre, que pueden incluir rocas, suelo, materia orgánica, aire y agua. Este fenómeno puede ocurrir en cualquier tipo de terreno pero es particularmente común en áreas con pendientes pronunciadas y suelos inestables (Cruden, D., Varnes, D., 1996).

Las causas de los deslizamientos de tierra son multifacéticas e incluyen factores naturales y humanos. Entre los factores naturales se encuentran las condiciones geológicas, como la composición y estructura del suelo y la roca, el relieve del terreno, y factores climáticos, como las precipitaciones intensas y los cambios de temperatura. Los factores humanos pueden incluir actividades como la deforestación, la construcción y las actividades mineras, que pueden alterar la estabilidad del suelo y contribuir a la ocurrencia de deslizamientos de tierra (Highland, L.M., Bobrowsky, P., 2008).

### **2.2.11.2. Impacto de los deslizamientos de tierra en plataformas viales**

Los deslizamientos de tierra pueden tener un impacto significativo en las plataformas viales, como carreteras y ferrocarriles. Este impacto puede incluir daños directos a la infraestructura, como el hundimiento o la deformación de la carretera, la obstrucción de las vías con escombros, y en casos extremos, la destrucción completa de tramos de carretera (Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F., Wang, G., 2005).

Además, los deslizamientos de tierra pueden interrumpir el tráfico y aislar comunidades, lo que puede tener graves consecuencias

económicas y sociales. Los deslizamientos de tierra también pueden provocar accidentes, poniendo en peligro la seguridad de los usuarios de las vías (Petley, D., 2012).

## **2.2.12. Tecnologías de refuerzo de suelos y su aplicabilidad**

### **2.2.12.1. Tecnologías actuales de refuerzo de suelos**

El refuerzo del suelo es una técnica de ingeniería geotécnica utilizada para mejorar la estabilidad del suelo y reducir la deformación. Las tecnologías de refuerzo de suelo más comunes incluyen los muros de contención, las geo-mallas, las geo-celdas, las columnas de piedra, la inyección de suelos y las geo-espumas (Winter, M. G., et al., 2008).

- Muros de contención: Son estructuras construidas para resistir la presión lateral del suelo cuando se desea un cambio de elevación que excede el ángulo natural de reposo del suelo (Krishna, A. M., 2016).
- Geo-mallas y Geo-celdas: Son materiales sintéticos en forma de malla y celdas, respectivamente, que se utilizan para reforzar el suelo. Proporcionan una mayor estabilidad al distribuir la carga de manera más uniforme (Dash, S. K., et al., 2001).
- Columnas de piedra: Son columnas de grava o roca triturada construidas en el suelo blando para mejorar su capacidad de soporte y reducir la deformación (Barksdale, R. D., Bachus, R. C., 1983).
- Inyección de suelos: Esta técnica implica la inyección de materiales como cemento o resinas químicas en el suelo para mejorar su resistencia y reducir su permeabilidad (Juran, I., et al., 1997).
- Geo-espumas: Son bloques de espuma de poliestireno que se utilizan para reducir la presión del suelo sobre las estructuras subterráneas y para aliviar la carga del suelo en suelos blandos (Stark, T. D., et al., 2004).

#### **2.2.12.2. Evaluación de la eficacia de las diferentes tecnologías de refuerzo**

La eficacia de las tecnologías de refuerzo de suelos puede variar significativamente en función de una variedad de factores, incluyendo el tipo de suelo, las condiciones de carga, la presencia de agua, las condiciones climáticas y la ejecución del proyecto. Por tanto, es importante realizar una evaluación detallada de la eficacia de cualquier tecnología de refuerzo de suelos propuesta.

Esta evaluación puede basarse en pruebas de laboratorio y de campo, análisis de elementos finitos, y la revisión de estudios de caso y literatura técnica relevante. La eficacia de la tecnología de refuerzo de suelos puede medirse en términos de su capacidad para mejorar la resistencia al corte del suelo, reducir la deformación, mejorar la capacidad de carga y aumentar la estabilidad general del talud o de la estructura de ingeniería civil (Handy, R. L., 2007).

#### **2.2.13. Impacto socioeconómico de los deslizamientos de tierra**

##### **2.2.13.1. Evaluación de las consecuencias económicas de los deslizamientos**

Las consecuencias económicas de los deslizamientos pueden ser significativas y de largo alcance. Pueden incluir los costos directos de reparar o reemplazar la infraestructura dañada, como carreteras, viviendas y servicios públicos. Además, las empresas locales pueden sufrir pérdidas económicas debido a interrupciones en la actividad comercial, y los individuos pueden enfrentar costos debido a daños a la propiedad personal (Corominas, J., et al., 2014).

Además, los deslizamientos pueden tener impactos económicos indirectos. Por ejemplo, pueden causar interrupciones en las redes de

transporte, lo que puede aumentar los costos de transporte y los tiempos de viaje, y reducir el acceso a mercados y servicios. Los deslizamientos también pueden llevar a un aumento en los costos de seguros y reducir el valor de las propiedades en las áreas afectadas (Petley, D., 2012).

#### **2.2.13.2. Evaluación del impacto social de los deslizamientos**

El impacto social de los deslizamientos también puede ser significativo. Los deslizamientos pueden causar lesiones o la pérdida de vidas humanas, lo cual tiene un impacto devastador en las comunidades afectadas. Los deslizamientos también pueden causar el desplazamiento de personas, lo que puede llevar a la pérdida de hogares y a la interrupción de las redes sociales (Sidle, R.C., Ochiai, H., 2006).

Los deslizamientos también pueden tener impactos psicosociales, ya que las personas afectadas pueden sufrir estrés y ansiedad debido a la pérdida de bienes, la interrupción de sus vidas y el temor a futuros deslizamientos. Esto puede llevar a problemas de salud mental a largo plazo en las comunidades afectadas (Anderson, M.B., Woodrow, P.J., 1989).

#### **2.2.13.3. Estrategias para minimizar el impacto socioeconómico de los deslizamientos**

Existen varias estrategias para minimizar el impacto socioeconómico de los deslizamientos. Estas pueden incluir:

- Prevención y mitigación: Esto implica la implementación de medidas de ingeniería y manejo del suelo para prevenir o reducir la probabilidad de deslizamientos. Esto puede incluir la reforestación de áreas desnudas, la estabilización de pendientes y el drenaje adecuado del agua (Lee, E.M., Jones, D.K., 2014).

- Planificación y regulación: Esto puede implicar el desarrollo y la implementación de regulaciones de planificación del uso del suelo que desalienten el desarrollo en áreas propensas a deslizamientos. También puede implicar la reubicación de personas y propiedades en áreas de alto riesgo (Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., Jaedicke, C., 2006).
- Educación y concienciación: Esto implica educar a las comunidades locales y a los responsables de la toma de decisiones sobre los riesgos de los deslizamientos y las medidas que pueden tomar para mitigar estos riesgos (Alexander, D., 2005).

#### **2.2.14. Viabilidad de la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos**

##### **2.2.14.1. Factores que afectan la viabilidad de la implementación**

La implementación de tecnologías de refuerzo de suelos puede ser afectada por varios factores, que pueden ser técnicos, económicos, sociales o ambientales (Winter, M. G., et al., 2008).

- Factores técnicos: incluyen las condiciones geológicas y geotécnicas del sitio, el tipo y las propiedades del suelo, la magnitud y la dirección de las cargas, la disponibilidad y la calidad de los materiales de construcción, la disponibilidad de maquinaria y equipo, y la capacidad técnica y la experiencia de la fuerza laboral.
- Factores económicos: incluyen el costo de los materiales, el equipo y la mano de obra, el tiempo de construcción, los costos de operación y mantenimiento, y la disponibilidad de financiamiento.
- Factores sociales: incluyen el impacto de la construcción en las comunidades locales, la aceptabilidad de la solución de ingeniería propuesta por la comunidad y los posibles efectos en la salud y la seguridad de los trabajadores y la comunidad.

- Factores ambientales: incluyen el impacto de la construcción en el medio ambiente, la necesidad de cumplir con las leyes y regulaciones ambientales, y la consideración de los principios de desarrollo sostenible.

#### **2.2.14.2. Análisis costo-beneficio de la implementación**

El análisis de costo-beneficio es una herramienta esencial para evaluar la viabilidad económica de un proyecto de refuerzo de suelos. Este análisis compara los costos totales de la implementación, incluyendo los costos de diseño, construcción, operación, mantenimiento y rehabilitación, con los beneficios que se obtendrán de la implementación de la tecnología de refuerzo de suelos (Boardman, A. E., et al., 2017).

Los beneficios pueden incluir la reducción de los daños a las carreteras y otras infraestructuras, la reducción de los costos de reparación y mantenimiento, la mejora de la seguridad vial, la reducción de los retrasos en el tráfico y la mejora del bienestar de la comunidad.

En la evaluación de los beneficios, también se pueden considerar los beneficios intangibles, como la mejora de la calidad de vida, la reducción del estrés y la mejora de la estética del paisaje. Sin embargo, la cuantificación de estos beneficios intangibles puede ser difícil y sujeta a incertidumbre.

### **2.3. Definición de términos básicos**

#### **Tecnología de refuerzo de suelos**

Se refiere a las técnicas y métodos utilizados para mejorar la resistencia y estabilidad del suelo en la construcción de infraestructuras, como carreteras, mediante la incorporación de materiales o elementos estructurales.

### **Deslizamiento**

Es un fenómeno en el cual una masa de suelo o roca se mueve de manera descendente o lateral debido a la pérdida de la estabilidad interna, causando deformaciones y daños en las estructuras construidas sobre él.

### **Plataforma vial**

Es la superficie sobre la cual se construye una carretera, proporcionando la base para la circulación de vehículos y peatones.

### **Recuperación**

Es el proceso de restauración y reparación de una plataforma vial dañada para devolverla a su condición funcional y segura.

### **Causas geotécnicas**

Son los factores y condiciones relacionados con las propiedades del suelo y su comportamiento, que pueden contribuir a la ocurrencia de deslizamientos y afectar la estabilidad de las plataformas viales.

### **Causas geológicas**

Son los factores y condiciones relacionados con las características geológicas del área, como la presencia de fallas, rocas débiles o procesos de erosión, que pueden influir en los deslizamientos y afectar las plataformas viales.

### **Daños**

Son las alteraciones, deformaciones o pérdidas que ocurren en las plataformas viales como consecuencia de los deslizamientos, lo cual puede afectar su funcionalidad y seguridad.

### **Deformaciones**

Son los cambios o distorsiones en la forma, geometría o estructura de las plataformas viales debido a los deslizamientos, que pueden incluir hundimientos, desplazamientos laterales, grietas y deformaciones en la superficie.

### **Consecuencias económicas**

Son los impactos económicos negativos resultantes de los deslizamientos en las plataformas viales, como los costos de reparación, la interrupción del flujo de tráfico, el aumento de los costos de transporte y los efectos en el sector turístico y la economía local.

### **Consecuencias sociales**

Son los impactos sociales derivados de los deslizamientos en las plataformas viales, como la afectación de la seguridad vial, la limitación de la movilidad de las personas, el acceso restringido a servicios esenciales y la disminución de la calidad de vida de la población local.

### **Viabilidad técnica**

Es la evaluación de la factibilidad y eficacia técnica de la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas, considerando la adaptabilidad de las soluciones propuestas a las condiciones específicas del sitio.

## **2.4. Formulación de hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

Hipótesis general: La implementación de tecnologías de refuerzo de suelos adecuadas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 permitirá recuperar y fortalecer las plataformas viales dañadas por deslizamientos, asegurando su estabilidad y durabilidad.

### **2.4.2. Hipótesis Específicas**

- Hipótesis específica 1: Las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón afectan las plataformas viales al debilitar la estabilidad del suelo y generar desplazamientos y deformaciones.

- Hipótesis específica 2: Los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón causan daños y deformaciones específicas en las plataformas viales, como hundimientos, desplazamientos laterales y grietas, que afectan su funcionalidad y seguridad.
- Hipótesis específica 3: Los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachón generan consecuencias económicas y sociales negativas, como costos de reparación, interrupción del tráfico, impacto en el turismo y disminución de la calidad de vida de la población, que pueden ser minimizadas mediante estrategias adecuadas.
- Hipótesis específica 4: Existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón, como pilotes, muros de contención, geotextiles, que pueden ser aplicadas de manera efectiva para mejorar la estabilidad del suelo.
- Hipótesis específica 5: La implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023 es viable técnica y económicamente, considerando la adaptabilidad de las soluciones al sitio específico, los costos de implementación y los beneficios a largo plazo.

## **2.5. Identificación de variables**

### **2.5.1. Variable independiente**

Las variables independientes son:

- Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon.
- Deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón.

- Consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachón.
- Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón, como pilotes, muros de contención, geotextiles y grouting.
- Implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023, considerando la adaptabilidad de las soluciones al sitio específico, los costos de implementación y los beneficios a largo plazo.

### **2.5.2. Variable dependiente**

La variable dependiente es:

- Recuperación y fortalecimiento de las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023.

### **2.5.3. Variable Interviniente**

- Características geográficas y climáticas: Incluyen las características del entorno geográfico, como la topografía, el clima, la precipitación pluvial y la geomorfología, que pueden influir en los deslizamientos y la respuesta de las tecnologías de refuerzo de suelos.
- Recursos disponibles: Se refiere a los recursos financieros, humanos, tecnológicos y materiales disponibles para la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos. Estos recursos pueden afectar la viabilidad técnica y económica del proyecto.
- Condiciones sociales y económicas: Incluyen factores sociales y económicos, como el impacto en la comunidad local, los costos de implementación, el acceso a servicios y el impacto en la economía regional. Estas condiciones pueden influir en la aceptación y sostenibilidad de las soluciones propuestas.

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

### Variable dependiente:

- Recuperación y fortalecimiento de las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023.
- Definición operacional: Se refiere al proceso de restablecer y mejorar la integridad estructural, la estabilidad y la funcionalidad de las plataformas viales que han sufrido daños debido a deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón durante el año 2023.
- Indicadores:
  - o Nivel de estabilidad alcanzado en las plataformas viales recuperadas.
  - o Mejora porcentual de la resistencia y capacidad de carga de las plataformas viales después del refuerzo.
  - o Reducción del número de deformaciones y daños observados en las plataformas viales recuperadas.

### VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón.
- Deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón.
- Consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachón.
- Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón.
- Implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023.
- Definiciones operacionales:
  - o Causas geotécnicas y geológicas: Se refiere a los factores relacionados con las características y propiedades geotécnicas y geológicas del suelo

y su entorno que contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón.

- Deslizamientos: Hace referencia al movimiento descendente o lateral de una masa de suelo o roca en la carretera Ninacaca – Huachón, como resultado de la pérdida de estabilidad.
  - Consecuencias económicas y sociales: Se refiere a los impactos económicos y sociales negativos que surgen como resultado de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachón, incluyendo costos de reparación, interrupción del tráfico, impacto en el turismo y disminución de la calidad de vida de la población.
  - Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles: Representa las diferentes técnicas y métodos existentes para fortalecer el suelo y recuperar las plataformas viales, como pilotes, muros de contención, geotextiles y grouting.
  - Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos propuestas: Se refiere a la aplicación y ejecución de las tecnologías de refuerzo de suelos seleccionadas para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón durante el año 2023.
- Indicadores
- Causas geotécnicas y geológicas:
    - Porcentaje de suelos con baja capacidad portante en la zona afectada.
    - Grado de permeabilidad del suelo en la zona de deslizamientos.
    - Presencia de discontinuidades geológicas (fallas, estratos débiles, etc.) en la zona de estudio.
  - Deslizamientos:
    - Número de deslizamientos registrados en la carretera Ninacaca – Huachón durante el año 2023.

- Volumen de suelo deslizado en los eventos registrados.
- Área afectada por los deslizamientos en la carretera.
- Consecuencias económicas y sociales:
  - Costo total estimado de reparación de los daños en las plataformas viales.
  - Tiempo promedio de interrupción del tráfico debido a los deslizamientos.
  - Impacto en el turismo local: disminución del número de visitantes o ingresos generados.
- Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles:
  - Tipos de tecnologías de refuerzo de suelos identificadas y analizadas en la literatura científica y técnica.
  - Disponibilidad y accesibilidad de los materiales y equipos necesarios para implementar cada tecnología.
- Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos propuestas:
  - Grado de aplicabilidad de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachón.
  - Costo estimado de implementación
  - Tiempo estimado de ejecución de las obras de refuerzo de suelos.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Tipo de investigación**

La investigación es de tipo aplicada. Esto significa que se enfoca en la aplicación práctica de conocimientos y técnicas para resolver problemas concretos y generar soluciones que sean de utilidad en un contexto específico. En este caso, se busca implementar tecnologías de refuerzo de suelos para recuperar las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023.

La investigación aplicada tiene como objetivo principal la transferencia de conocimiento y la generación de resultados que puedan ser aplicados directamente en la práctica. Se busca proporcionar respuestas y soluciones a problemas reales y contribuir al mejoramiento de la infraestructura vial. En este proyecto, se busca implementar de manera efectiva y viable las tecnologías de refuerzo de suelos con el fin de restablecer la estabilidad y durabilidad de las plataformas viales afectadas por los deslizamientos.

El enfoque aplicado implica la realización de estudios específicos, experimentos y análisis de datos que permitan obtener conclusiones prácticas y aplicables en el ámbito de la ingeniería vial. Se busca que los resultados de la

investigación tengan un impacto directo en la toma de decisiones y en la planificación de las acciones necesarias para la recuperación de las plataformas viales.

### **3.2. Nivel de investigación**

El nivel de investigación en el proyecto "Implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023" es investigación aplicada.

La investigación aplicada se enfoca en la aplicación de conocimientos teóricos y científicos para resolver problemas prácticos y generar soluciones que sean de utilidad en un contexto específico. En este caso, el objetivo principal es abordar el problema de las plataformas viales dañadas por deslizamientos y encontrar soluciones prácticas para su recuperación.

La investigación aplicada se diferencia de otros niveles de investigación, como la investigación básica o la investigación exploratoria. Mientras que la investigación básica busca ampliar el conocimiento teórico y comprender los fundamentos científicos subyacentes, y la investigación exploratoria busca explorar y descubrir nuevas ideas y enfoques, la investigación aplicada tiene un enfoque más práctico y orientado a la solución de problemas concretos.

En este proyecto, se busca implementar tecnologías de refuerzo de suelos específicas para la recuperación de las plataformas viales dañadas por deslizamientos en una ubicación específica y en un período de tiempo específico. Se espera obtener resultados y recomendaciones prácticas que puedan aplicarse directamente en la planificación y ejecución de las obras de recuperación.

### 3.3. Métodos de investigación

El método de investigación utilizado en este proyecto puede ser el método científico. El método científico es un enfoque sistemático y objetivo para obtener conocimiento válido y confiable. En el contexto de este proyecto, se seguirían los pasos del método científico para abordar la problemática planteada.

Los pasos típicos del método científico son los siguientes:

- Observación: Se realiza una observación detallada y cuidadosa de la situación problemática, en este caso, los deslizamientos y los daños en las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón.
- Planteamiento del problema: Se formula claramente el problema de investigación, en este caso, cómo implementar tecnologías de refuerzo de suelos para recuperar las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023.
- Recopilación de datos: Se recopilan datos relevantes y se realiza una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con las causas de los deslizamientos, las tecnologías de refuerzo de suelos y los impactos económicos y sociales.
- Formulación de hipótesis: Se formulan hipótesis basadas en conocimientos previos y en la información recopilada. Por ejemplo, se plantean hipótesis sobre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos y la efectividad de las tecnologías de refuerzo de suelos.
- Diseño de la investigación: Se establece un diseño de investigación adecuado para recopilar datos y probar las hipótesis. Puede incluir métodos de recolección de datos como muestreo, análisis de laboratorio, simulaciones numéricas, entre otros.
- Análisis de datos: Se analizan los datos recopilados utilizando técnicas y herramientas apropiadas. Se evalúa la relación entre las variables, se

realizan pruebas estadísticas y se generan conclusiones basadas en los resultados obtenidos.

- Interpretación de resultados: Se interpretan los resultados obtenidos a partir del análisis de datos y se relacionan con las hipótesis planteadas. Se evalúa si los datos respaldan o refutan las hipótesis.
- Conclusiones y recomendaciones: Se extraen conclusiones basadas en los resultados de la investigación y se formulan recomendaciones prácticas y aplicables para la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos en la carretera Ninacaca – Huachón.

### **3.4. Diseño de investigación**

El diseño de investigación para el proyecto "implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón en el año 2023" puede ser un diseño mixto, que combina elementos cualitativos y cuantitativos.

El diseño mixto permitirá abordar de manera integral los objetivos planteados en la investigación, combinando la recopilación y análisis de datos cuantitativos para obtener información numérica y estadística, y la recopilación y análisis de datos cualitativos para obtener una comprensión profunda de los factores geotécnicos, geológicos, económicos y sociales relacionados con los deslizamientos y la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos.

En cuanto a la parte cuantitativa, se pueden emplear técnicas como el muestreo sistemático para recopilar datos sobre los deslizamientos, los daños en las plataformas viales y las consecuencias económicas. Se pueden utilizar mediciones objetivas y datos estadísticos para evaluar el grado de daño, el volumen de suelo deslizado, los costos económicos, entre otros.

En la parte cualitativa, se pueden utilizar métodos como entrevistas, grupos focales y análisis de documentos para recopilar información sobre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos, así como la percepción de los actores involucrados sobre los impactos económicos y sociales. Estos métodos cualitativos permitirán obtener una comprensión más profunda de los factores subyacentes y las experiencias de las personas afectadas.

El diseño mixto permitirá complementar los resultados cuantitativos con las perspectivas cualitativas, lo que brindará una visión más completa y holística del problema y permitirá tomar decisiones informadas sobre las tecnologías de refuerzo de suelos a implementar.

Además, es importante mencionar que el diseño de investigación deberá incluir una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica relacionada con las tecnologías de refuerzo de suelos, así como el análisis de casos de estudio similares de recuperación de plataformas viales dañadas por deslizamientos. Esto proporcionará información y orientación adicional para el diseño y la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos en la carretera Ninacaca – Huachón.

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Población**

La población en este proyecto de investigación serían todas las plataformas viales dañadas por deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, se trata de una única plataforma vial afectada, por lo que la población se reduce a esa plataforma específica.

### **3.5.2. Muestra**

La muestra estará compuesta por una representación exhaustiva y diversificada de la plataforma vial afectada, incluyendo aspectos geotécnicos, geológicos y las opiniones de los usuarios, para respaldar de manera integral la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos en la recuperación de la carretera Ninacaca – Huachon.

### **3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

- Observación: la observación directa de la plataforma vial dañada puede proporcionar información sobre los daños visibles, las deformaciones y las condiciones geotécnicas presentes. Se puede utilizar una lista de verificación o un formulario de registro para documentar y clasificar los diferentes tipos de daños observados.
- Análisis de registros y documentos existentes: Se puede realizar un análisis de registros y documentos existentes, como informes técnicos, estudios geotécnicos previos, registros de mantenimiento vial, informes de accidentes y datos económicos relevantes. Estos documentos pueden proporcionar información importante sobre la historia de los deslizamientos, los daños anteriores, los métodos de construcción utilizados y otros aspectos relevantes para la investigación.
- Mediciones y pruebas de laboratorio: Se pueden realizar mediciones in situ, como la toma de muestras de suelo y pruebas geotécnicas, para evaluar las características del suelo y determinar su resistencia, permeabilidad y otras propiedades relevantes. Las pruebas de laboratorio, como ensayos de compresión y corte, pueden complementar las mediciones in situ para obtener datos más precisos y detallados.

### **3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

- **Análisis descriptivo:** esta técnica implica el uso de medidas estadísticas y gráficas para resumir y describir los datos recopilados. Se pueden calcular medidas de tendencia central, como la media, la mediana y la moda, así como medidas de dispersión, como la desviación estándar y el rango. Además, se pueden utilizar gráficos como histogramas, gráficos de barras o gráficos de dispersión para visualizar los datos y detectar patrones o tendencias.
- **Análisis cualitativo:** Si se han recopilado datos cualitativos, como respuestas de entrevistas o análisis de documentos, se puede utilizar el análisis cualitativo para identificar temas recurrentes, categorías o patrones emergentes. Esto implica una revisión sistemática y detallada de los datos para extraer información relevante y obtener una comprensión más profunda de los hallazgos cualitativos. Se pueden utilizar técnicas como la codificación temática, el análisis de contenido o el análisis narrativo para organizar y analizar los datos cualitativos.
- **Análisis estadístico:** Si se han recopilado datos cuantitativos, se pueden utilizar técnicas estadísticas para analizar las relaciones y asociaciones entre las variables. Esto puede implicar el uso de pruebas de hipótesis, como la prueba t o la prueba de chi-cuadrado, para determinar la significancia estadística de las diferencias o relaciones observadas. Además, se pueden realizar análisis de regresión para examinar las relaciones entre variables independientes y la variable dependiente, como el impacto de las tecnologías de refuerzo de suelos en la estabilidad de las plataformas viales.

### **3.8. Tratamiento estadístico**

- **Análisis descriptivo:** se puede realizar un análisis descriptivo de los datos para obtener medidas resumidas y descripciones de las variables relevantes. Esto puede incluir el cálculo de estadísticas descriptivas como la media, la

mediana, la moda, la desviación estándar y el rango. Estas medidas proporcionan información sobre la tendencia central, la dispersión y la distribución de los datos.

- Pruebas de hipótesis: Si se plantean hipótesis específicas, se pueden realizar pruebas de hipótesis estadísticas para evaluar la significancia de las diferencias o relaciones observadas en los datos. Por ejemplo, se pueden aplicar pruebas t para comparar las medias de dos grupos, pruebas de chi-cuadrado para analizar asociaciones entre variables categóricas, o pruebas de correlación para examinar las relaciones lineales entre variables continuas.

### **3.9. Orientación ética filosófica y epistémica**

La orientación ética en la investigación es fundamental para garantizar que llevemos a cabo nuestras investigaciones de manera responsable, respetando los principios éticos y los derechos de los participantes involucrados. Es esencial abordar cualquier preocupación ética y asegurar el bienestar de las personas y las comunidades afectadas por nuestra investigación.

En nuestro proyecto de investigación sobre la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos para la recuperación de plataformas viales dañadas, nos comprometemos a seguir principios éticos rigurosos. Algunos aspectos éticos relevantes que tenemos en cuenta incluyen:

- Consentimiento informado: Nos aseguramos de obtener el consentimiento informado de todas las personas involucradas en nuestra investigación, como los propietarios de las tierras, los ingenieros viales y las comunidades locales. Queremos asegurarnos de que estén plenamente informados sobre el propósito de nuestro estudio, los procedimientos involucrados y los posibles riesgos y beneficios.

- Confidencialidad y privacidad: Valoramos y respetamos la confidencialidad y privacidad de los participantes en nuestra investigación. Nos comprometemos a manejar todos los datos recopilados de manera segura y confidencial, evitando la divulgación de información personal identificable sin el consentimiento adecuado.
- Protección de los derechos humanos: Nos esforzamos por garantizar que los derechos y la dignidad de todas las personas involucradas en nuestra investigación sean respetados y protegidos. Rechazamos cualquier forma de discriminación o trato injusto y trabajamos para garantizar que todas las personas sean tratadas con igualdad y respeto.
- Beneficio y justicia: Consideramos cuidadosamente los posibles beneficios y riesgos de nuestra investigación para todas las partes involucradas. Nuestro objetivo principal es contribuir al mejoramiento de la infraestructura vial y la calidad de vida de la comunidad afectada, asegurando que nuestros resultados sean utilizados de manera justa y equitativa.
- Transparencia y divulgación: Nos comprometemos a ser transparentes en la comunicación de nuestros resultados de investigación. Compartiremos información relevante con la comunidad científica, las partes interesadas y el público en general de una manera clara y comprensible, promoviendo la transparencia y la difusión del conocimiento generado.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Descripción del trabajo de campo**

##### **4.1.1. Objetivo del control de erosión de la plataforma KM 40+590 al KM 40+630**

El objetivo principal de este estudio es sustentar y cuantificar de manera detallada las partidas y actividades que se requieren debido a la presencia de erosión en la plataforma vial, específicamente en el tramo comprendido entre el KM 40+590 y el KM 40+630 (el más crítico), se ha constatado que el proyectista, no ha proporcionado una solución definitiva para abordar esta problemática.

En el desarrollo de esta investigación, se analizarán detalladamente las circunstancias que llevaron a la identificación de la erosión en la plataforma vial y la necesidad de implementar un muro TEM terragabion como medida correctiva. Asimismo, se examinará la documentación relevante, como informes técnicos y planos, para obtener una comprensión completa del alcance de la obra y sus implicancias en el proyecto general.

Mediante el uso de métodos de investigación adecuados, se evaluará la viabilidad técnica y financiera de la adición propuesta, así como su impacto en el cronograma y los recursos disponibles. La investigación se llevará a cabo

siguiendo los principios éticos, garantizando la veracidad y objetividad de los hallazgos, y manteniendo la confidencialidad de la información sensible.

Se espera que los resultados de esta investigación proporcionen una base sólida para la toma de decisiones en cuanto a la incorporación en la Obra en el proyecto general de "MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA NINACACA - HUACHÓN, PROVINCIA PASCO - REGIÓN PASCO", contribuyendo así a la mejora de la infraestructura vial en la región y a la optimización de los recursos destinados a esta importante obra pública.

#### **4.1.2. Justificación de la propuesta de construcción "muro TEM TERRAGABION km 40+590 al km 40+630"**

La justificación de los trabajos para la construcción de "MURO TEM TERRAGABION KM 40+590 AL KM 40+630" se fundamenta en la existencia de un derrumbe y la pérdida de la plataforma del trazo de la carretera proyectada, lo cual constituye una razón suficiente para llevar a cabo estas actividades. Las partidas planteadas son necesarias para poder cumplir con las metas y objetivos del proyecto en su conjunto.

Con el propósito de cumplir con los objetivos de la obra mencionada, se presenta la propuesta para la ejecución de las partidas correspondientes. Estas partidas consisten en la implementación de un sistema Terramesh, que es un sistema modular utilizado para construir un muro de tierra mecánicamente estabilizado con revestimiento de gaviones.

El sistema Terramesh se compone de unidades modulares que forman un muro con revestimiento de gaviones. Estas unidades están diseñadas con paneles traseros y diafragmas que se conectan a la fachada principal, creando celdas rectangulares utilizadas para contener las piedras. El refuerzo de la geomalla, la fachada y el remate forman un panel de malla continua.

La instalación de las unidades de geomalla es sencilla y no requiere moldes o encofrados externos, ya que los ángulos de refuerzo soportan la superficie en el ángulo designado. El relleno estructural se coloca sobre las geomallas de refuerzo del suelo, y se dispone un relleno adecuado detrás de la superficie principal.

La ejecución de la estructura del MURO TEM TERRAGABION KM 40+590 AL KM 40+630 se propone con el objetivo de mejorar la estabilidad interna del relleno y restaurar la plataforma, ya que se ha evidenciado la presencia de erosión en la progresiva 40+590 al km 40+630.

La implementación de este sistema Terramesh contribuirá a garantizar la estabilidad y durabilidad de la obra, permitiendo recuperar la plataforma afectada por la erosión, y asegurando el cumplimiento de los objetivos establecidos para el proyecto.



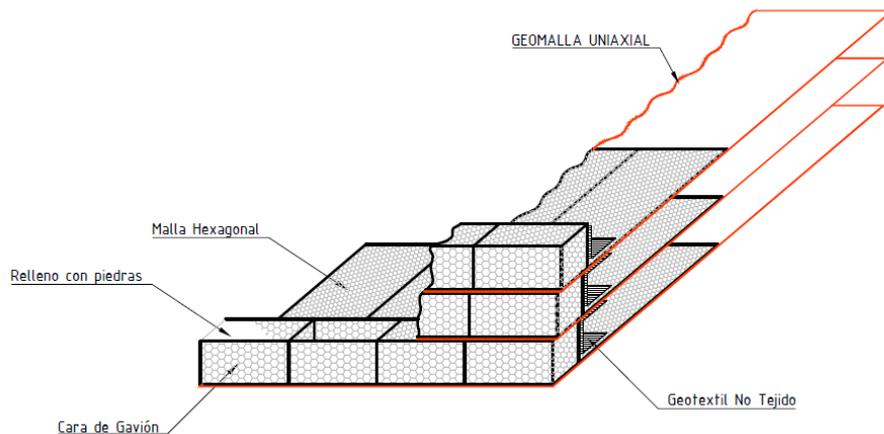
*Ilustración 1: Progresiva 40+590 al km 40+630, lugar donde se evidencia la erosión y deslizamiento de la plataforma (Fuente: propio)*

#### **4.1.3. Descripción de los trabajos a realizar**

El sistema de suelo reforzado propuesto consiste en la construcción de un muro de contención, donde cada elemento de su pared externa está anclado en

el terreno mediante paños de red de malla hexagonal a doble torsión empotrada. Esta estructura formará el cuerpo del suelo reforzado. Además, se incorporará una extensión de Geomalla uniaxial en el mismo plano y en cada nivel de la malla hexagonal, con el propósito de mejorar la estabilidad interna de la sección del terraplén en las zonas críticas.

En la siguiente ilustración muestra el acoplamiento de la Malla hexagonal de terragabi6n y la Geomalla uniaxial. Las Geomallas uniaxiales son tejidas con hilos de multifilamento de poli6ster de alta tenacidad y alto peso molecular, lo que les confiere un sistema de drenaje.



*Ilustraci6n 2: Malla hexagonal de terragabi6n y Geomalla uniaxial (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)*

Este dise1o ha sido detallado con planos del y se presenta en los anexos como la soluci6n para fortalecer y estabilizar el terrapl6n afectado. La combinaci6n de la Malla hexagonal de terragabi6n y la Geomalla uniaxial asegurar6 la resistencia y durabilidad necesarias para mantener la integridad del muro de contenci6n ante condiciones adversas y factores geot6cnicos desafiantes.

#### **4.1.4. Descripción del trabajo de campo**

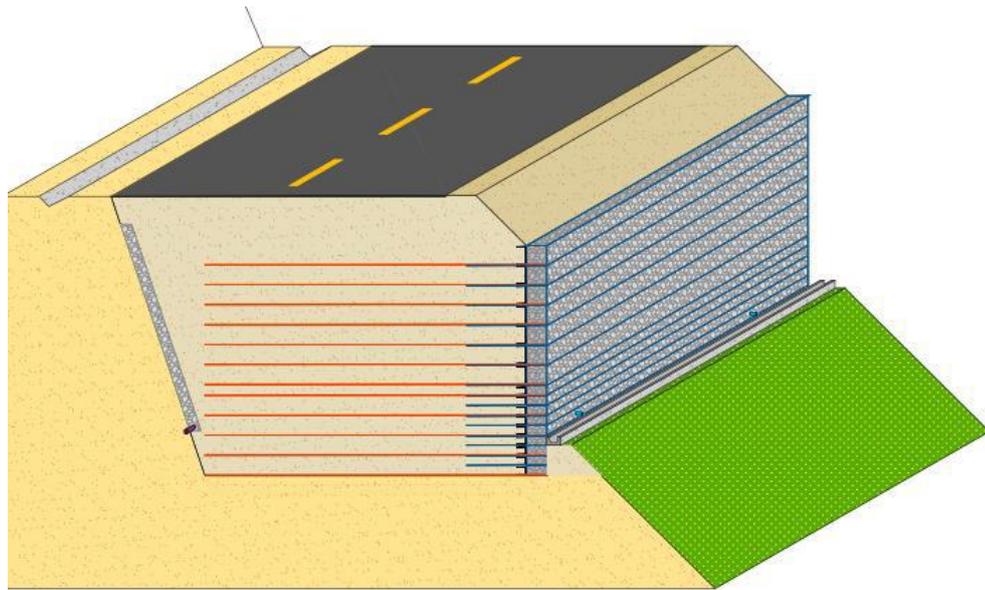
##### **4.1.4.1. Introducción**

Los muros de contención adoptados en este proyecto se han diseñado y construido utilizando la innovadora tecnología de Tierra Armada. Este enfoque se basa en la estabilización mecánica de un terraplén mediante la incorporación estratégica de geomallas de refuerzo en el interior del material de relleno. La efectividad del sistema radica en la fricción generada entre la superficie del refuerzo y el material circundante. La estabilidad interna del muro se garantiza considerando factores de rotura y arrancamiento del refuerzo.

Asimismo, la estabilidad externa del muro se asegura al resistir las fuerzas horizontales de los empujes estáticos y pseudoestáticos del suelo que se busca contener. Esta combinación de factores resulta en la formación de un macizo completamente estable, brindando confianza y seguridad a la estructura.

Para prevenir procesos erosivos y proteger el muro, se opta por cubrir su paramento con gaviones, que son estructuras de malla rellenas de piedras. Estos gaviones se integran al sistema y proporcionan una protección adicional contra los agentes erosivos.

La interacción entre los TerraGabiones y las geomallas uniaxiales de refuerzo se produce debido al peso propio del TerraGabion y a la fricción generada en la interfaz, lo que contribuye a la solidez y estabilidad general del muro de contención. Este enfoque técnico garantiza una estructura resistente y duradera, adecuada para enfrentar los desafíos geotécnicos específicos del proyecto.



*Ilustración 3: Esquema Referencial Muro de Tierra Armada tipo TerraGabion (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)*

#### **4.1.4.2. Alcance del diseño**

La teoría de los muros de Tierra Armada con geomallas de refuerzo implica un análisis exhaustivo que abarca tanto la estabilidad externa, evaluando el comportamiento de la estructura en su conjunto, como la estabilidad interna, donde se estudia la transferencia de esfuerzos desde el relleno hacia las geomallas de refuerzo.

En el proyecto de investigación se encuentran detallados los análisis tanto de estabilidad externa como de estabilidad interna de los muros de Tierra Armada, siguiendo rigurosamente las directrices establecidas en la Norma AASHTO LRFD 2012, la guía de diseño Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls (FHWA-NHI-10-024).

Cabe destacar que todos los cálculos efectuados se realizaron con una perspectiva de vida útil del proyecto de 50 años, y se consideraron una aceleración pico de terreno de  $PGA = 0.25g$  y una Temperatura Promedio Anual de  $10^{\circ}C$ .

Es relevante mencionar que en este proyecto se optó por un diseño basado en factores de carga y resistencia LRFD (Load and Resistance Factor Design), según lo estipulado en la norma AASHTO LRFD 2012, en lugar de seguir la metodología de diseño de tensiones admisibles ASD (Allowable Stress Design) que utiliza factores de seguridad explícitos. La metodología LRFD, en vez de factores de seguridad convencionales, emplea incrementos en las cargas de demanda y reducciones en la capacidad de resistencia, asegurando que las resistencias factoradas sean superiores a las cargas amplificadas. Para evaluar este aspecto, se introduce el parámetro CDR (Capacity to Demand Ratio), el cual representa la relación entre la Capacidad de Resistencia y la Demanda Solicitada. Con estos análisis y enfoques metodológicos, se busca asegurar una estructura sólida y confiable, cumpliendo con los estándares internacionales y garantizando la estabilidad y durabilidad del muro de Tierra Armada durante toda su vida útil.

#### 4.1.4.3. Parámetros De Diseño

##### 4.1.4.3.1 Parámetros Geotécnicos

*Tabla 1: Parámetros de Diseño (Fuente: CVNH)*

<b>Material</b>	<b>Descripción del Material</b>	<b>Ángulo de Fricción (°)</b>	<b>Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cohesión c' (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	Material de relleno	34	18	0
<b>2</b>	Material retenido	34	18	0
<b>3</b>	Suelo de fundación	28.9	16.2	4.5

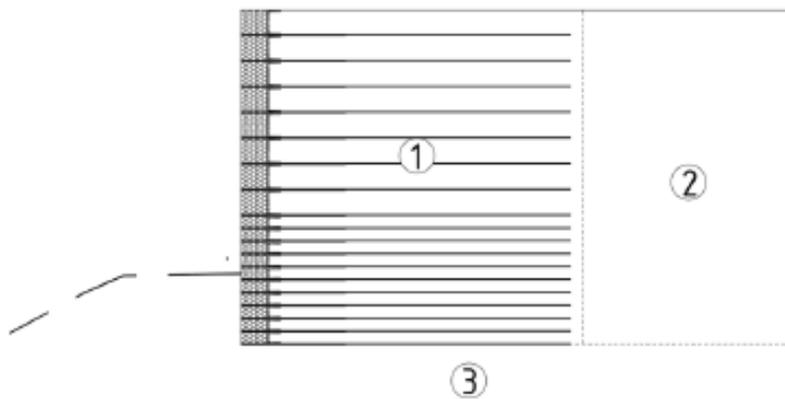


Ilustración 4: parámetros de Diseño (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)

#### 4.1.4.3.2 Materiales

Terragabion es un elemento estructural prismático, similar a una caja, fabricado a partir de una malla hexagonal de doble torsión. El alambre utilizado para esta malla ha sido revestido con una triple capa de zinc, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM A641, lo que garantiza su resistencia y durabilidad. Además, esta malla está protegida con un recubrimiento de PVC, proporcionando una capa adicional de protección contra la corrosión. Una vez configurada la estructura, los Terragabions se rellenan con piedras, transformándose en estructuras flexibles, permeables y monolíticas. Este diseño inteligente les permite adaptarse a variaciones en el terreno y resistir fuerzas naturales, como la erosión y el deslizamiento del suelo. La versatilidad y resistencia de los Terragabions los hace ideales para ser utilizados en la construcción de muros de suelo reforzado. Pueden soportar grandes cargas y facilitar el drenaje del agua, lo que los

convierte en una solución robusta y eficiente para proyectos de ingeniería civil y geotécnica.

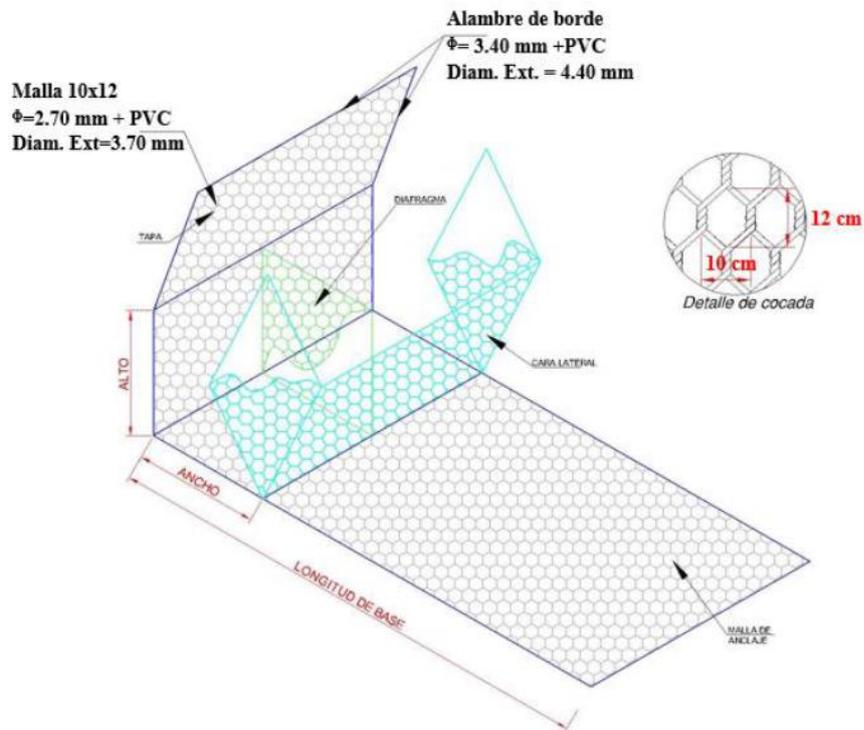
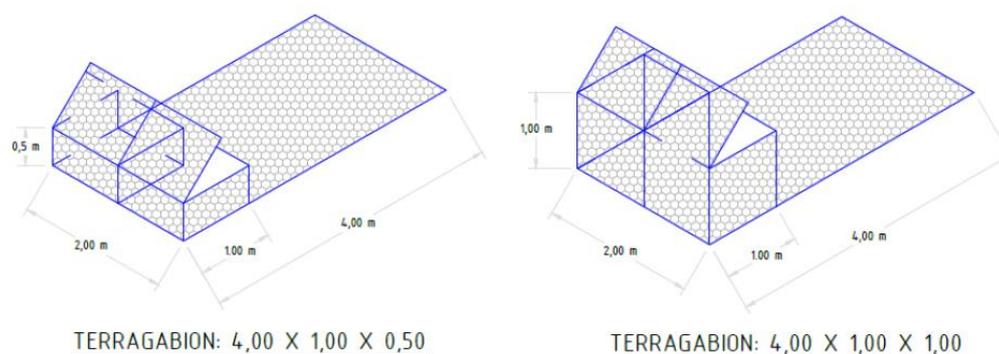


Ilustración 5: Cajas de malla doble torsión (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)

El muro TEM proyectado cuenta con un paramento flexible, que se compone de dos variedades de Terragabion: Tipo A y Tipo B. La principal distinción entre ellos radica en la altura del elemento una vez instalado. El Terragabion Tipo A tiene una altura (H) de 1.00 metro, mientras que el Tipo B presenta una altura menor, concretamente de 0.50 metros.

En general, ambos tipos de Terragabion tienen dimensiones similares en cuanto a longitud y ancho. Poseen una longitud total de base de 4.00 metros y un ancho de 2.00 metros. Además, la longitud base de la caja del Terragabion es de 1.00 metro. Esta uniformidad en las medidas facilita su manejo e instalación, además de permitir la combinación de

ambos tipos en la construcción del muro, según las necesidades específicas de cada proyecto.



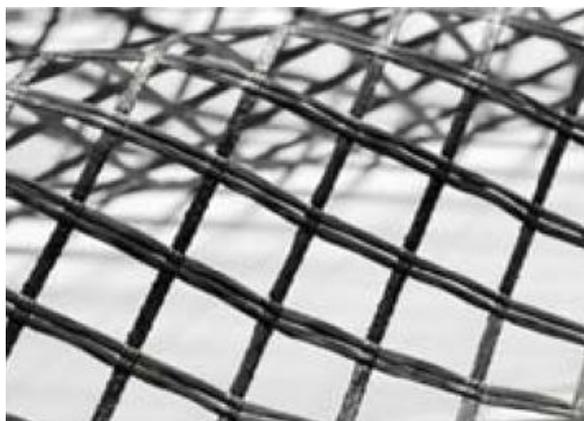
*Ilustración 6: Tipos de Terragabion empleados en el proyecto (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)*

Las Geomallas Uniaxiales TerraGrid son geomallas tejidas confeccionadas a partir de hilos de multifilamento de poliéster de alta tenacidad y alto peso molecular. Estos hilos se revisten con PVC para asegurar una protección óptima del núcleo del material. Este producto final destaca por su resistencia a los daños que puedan surgir durante la instalación, así como su durabilidad frente a ataques químicos, biológicos y factores ambientales.

El diseño de las Geomallas Uniaxiales TerraGrid es particularmente apropiado para la estabilización de estructuras de suelo reforzado, entre otras aplicaciones. Esto las convierte en una solución versátil y robusta para diversos retos de ingeniería civil y geotécnica.

En este proyecto en particular, se utilizará la Geomalla Tejida Uniaxial TerraGrid 120. Este modelo específico, al igual que el resto de la gama TerraGrid, comparte

las mismas propiedades de resistencia y versatilidad, adaptándose a las necesidades específicas de este proyecto.



*Ilustración 7: Geomalla Uniaxial TerraGrid (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)*

El Relleno Estructural para el Muro TEM debe cumplir con ciertas propiedades mínimas esenciales para garantizar una adecuada interacción entre el refuerzo y el relleno, y así asegurar la correcta transferencia de esfuerzos del relleno al refuerzo. Los materiales de relleno deben ser procesados para que cumplan con los requerimientos granulométricos especificados en el cuadro siguiente:

*Tabla 2: Granulometría del Relleno Estructural*

<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% que Pasa</b>
<b>80 (3")</b>	100%
<b>20 (3/4")</b>	50-100%
<b>5 (N°4)</b>	20-50%
<b>0.08 (N°200)</b>	0-15%

El Cuadro detalla la granulometría requerida para el Relleno Estructural:

- Tamiz de 80 mm (3"): 100% de los materiales deberán pasar por este tamiz.

- Tamiz de 20 mm (3/4"): El porcentaje de material que pasa a través de este tamiz debe estar entre el 50 y 100%.
- Tamiz N°4 de 5 mm: Entre el 20 y 50% de los materiales deben pasar por este tamiz.
- Tamiz N°200 de 0.08 mm: Un máximo del 15% de los materiales deberán pasar por este tamiz.

Estos requisitos garantizan que el Relleno Estructural tenga la composición adecuada para funcionar eficazmente en conjunto con el refuerzo en la construcción del Muro TEM.

Así mismo el material de relleno debe de cumplir con los siguientes requerimientos:

*Tabla 3: Requerimiento del material de relleno (Fuente: Propio)*

<b>Requerimientos del Material de Relleno</b>	<b>Valor Requerido</b>
<b>pH del Relleno</b>	Entre 3 y 9
<b>Material Orgánico</b>	≤ 1%
<b>Compactación</b>	95% del Proctor Modificado
<b>Espesor de la capa de compactación</b>	30cm (máximo)
<b>% Material Fino (&lt;#200 ASTM)</b>	Menor al 15%
<b>Variación en la humedad óptima</b>	± 2%
<b>Tamaño Máximo TMAX</b>	3"
<b>Coefficiente de Uniformidad (CU)</b>	Mayor a 4
<b>Índice de Plasticidad</b>	Entre 0 y 6
<b>Contenido de sales solubles</b>	≤ 1.0%

Y aquí, las propiedades de resistencia efectivas que debe cumplir:

*Tabla 4: Propiedades de resistencia efectiva (Fuente: Propio)*

<b>Propiedades de Resistencia Efectivas</b>	<b>Valor Requerido</b>
<b>Cohesión efectiva</b>	0 kPa
<b>Ángulo de fricción interna efectiva</b>	≥ 34°
<b>Peso Específico</b>	18 kN/m <sup>3</sup>

#### **4.1.4.3.3 Cargas Verticales o empuje vertical**

El empuje vertical en un muro de Tierra Armada (EV) es una cantidad que depende directamente de la altura del macizo y se calcula a partir de su peso unitario. La fórmula para determinar este empuje es la siguiente:

$$EV = \gamma_1 \cdot H \cdot B$$

Donde la explicación de los componentes de la fórmula es:

- $\gamma_1$ : Es el peso unitario del relleno del macizo de Tierra Armada. Este valor representa la densidad del material de relleno utilizado en el muro y se mide en  $\text{kN/m}^3$ .
- H: Corresponde a la altura del muro. Esta cantidad se mide en metros (m) y es una medida de qué tan alto es el muro de Tierra Armada.
- B: Es el ancho de base del muro. Al igual que la altura, esta cantidad se mide en metros (m) y representa la longitud del muro en su parte inferior o base.

El producto de estos tres factores proporciona el empuje vertical (EV) del muro, que es una medida de la fuerza que el muro ejerce verticalmente debido a su propio peso y al del relleno que soporta. Esta medida es crucial para el diseño y la evaluación de la estabilidad del muro.

#### **4.1.4.3.4 Empuje horizontal**

El empuje horizontal (EH) en un muro de Tierra Armada es la fuerza lateral ejercida por el relleno contenido en el macizo. Esta cantidad se calcula utilizando el método de la

cuña de Coulomb, que toma en cuenta el ángulo de fricción interna del relleno y la geometría del muro. La fórmula para determinar el empuje horizontal es:

$$EH = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_2 \cdot H^2$$

Los componentes de esta fórmula se explican de la siguiente manera:

- $K_a$ : Este es el Coeficiente de Empuje Activo del relleno retenido. Este coeficiente refleja la capacidad del relleno de resistir el movimiento o la deformación. Es una cantidad adimensional y se calcula generalmente a través de las propiedades del suelo y la inclinación del muro.
- $\gamma_2$ : Es el peso unitario del relleno retenido. Similar al peso unitario del relleno del macizo en el cálculo del empuje vertical, este valor representa la densidad del material de relleno que está siendo retenido por el muro. Se mide en  $\text{kN/m}^3$ .
- $H$ : Corresponde a la altura del muro, medida en metros (m).

El producto de estos factores proporciona el empuje horizontal (EH), que es una medida de la fuerza lateral que el relleno ejerce sobre el muro. Este valor es crítico para evaluar la estabilidad y seguridad del muro de Tierra Armada.

#### **4.1.4.3.5 Carga viva**

La carga viva (LL) en el contexto del diseño de un muro de Tierra Armada se refiere a las cargas adicionales o temporales que puede soportar la estructura, como el tráfico vehicular, las personas o la nieve acumulada, por ejemplo. En

este caso, la sobrecarga considerada para el diseño de la estructura es equivalente a 12 kN/m<sup>2</sup>.

Esto significa que, además de las cargas permanentes o estáticas como el peso propio del muro y el relleno que contiene, la estructura ha sido diseñada para soportar una carga adicional o temporal de hasta 12 kN por metro cuadrado.

Es importante mencionar que si es necesario actualizar la carga o la configuración de alguna de ellas, se debe validar la propuesta técnica transmitida. Esto garantiza que cualquier cambio en las cargas o en la configuración de la estructura no comprometerá su estabilidad y seguridad.

#### **4.1.4.3.6 Cargas sísmicas**

Las cargas sísmicas (EQ) se refieren a las fuerzas que resultan de un evento sísmico, como un terremoto, que pueden influir en la estabilidad de un muro de Tierra Armada. Según los estudios realizados en el área del proyecto, se ha determinado que las aceleraciones máximas horizontales en el suelo son de 0.25g.

Para los análisis de estabilidad externa mediante métodos pseudo estáticos para muros y taludes, se recomienda utilizar un coeficiente no menor a 0.5 veces la aceleración máxima del Terreno (PGA, por sus siglas en inglés de Peak Ground Acceleration). Esta es una medida de la intensidad del terremoto en un lugar específico y se usa para evaluar la capacidad de una estructura para resistir las cargas sísmicas.

Por lo tanto, en este proyecto, el coeficiente mínimo de aceleración sísmica horizontal que se ha utilizado para los análisis de estabilidad externa del muro de Tierra Armada es  $A=0.123$ . Este coeficiente refleja la magnitud de la carga sísmica que se espera que la estructura pueda soportar durante un terremoto. Es un factor crítico en el diseño de la estructura y su resistencia a eventos sísmicos.

#### **4.1.4.3.7 Estabilidad interna**

La estabilidad interna en el diseño de un muro de Tierra Armada se refiere a la capacidad del muro para resistir las fuerzas internas que surgen debido a las cargas que soporta. En el contexto de un diseño sísmico, estas fuerzas incluyen las fuerzas de inercia que surgen tanto en el macizo como en el relleno retenido durante un evento sísmico.

El diseño sísmico que se menciona en la AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transporte Estatal) considera estas fuerzas de inercia incorporando un coeficiente sísmico horizontal,  $A_m$ . Este coeficiente depende del coeficiente de aceleración máxima del suelo,  $A$ .

En este caso, se ha determinado que el coeficiente sísmico horizontal,  $K_h$ , es igual a  $A_m$ , y se le ha asignado un valor de 0.30. De esta manera, la fórmula es  $K_h = A_m = 0.30$ .

En este contexto:

- $A_m$  y  $K_h$  representan el coeficiente de aceleración sísmica horizontal, que es una medida de la aceleración máxima que se espera que ocurra durante un evento sísmico.

- A representa el coeficiente de aceleración máxima, que es una medida de la mayor aceleración que se espera que ocurra en el suelo durante un evento sísmico.

Por lo tanto, la fórmula indica que la aceleración máxima que se espera en el muro durante un evento sísmico es el 30% de la aceleración máxima del suelo.

#### **4.1.4.3.8 Estabilidad Interna**

Según lo establecido en la norma AASHTO (Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transporte Estatal), los análisis de estabilidad externa bajo condiciones sísmicas deben considerar ciertas fuerzas adicionales. Estas incluyen una fuerza horizontal, denominada PIR, que es debido a la inercia de una porción de la masa del suelo reforzado (representada por  $0.5 H^2$ , donde H es la altura del muro), y el 50% del empuje dinámico horizontal, PAE.

En términos simples, estas fuerzas representan los efectos de un terremoto sobre el muro y el suelo que está reteniendo. La fuerza PIR es una medida de cuánta fuerza se genera por la inercia de la masa del suelo reforzado durante un terremoto. Por otro lado, PAE es una medida de cuánta fuerza lateral o empuje se ejerce sobre el muro debido a la aceleración del suelo durante un evento sísmico.

Por lo tanto, los análisis de estabilidad deben tener en cuenta estas fuerzas adicionales para asegurar que el muro pueda resistir las cargas sísmicas sin fallar. Esto es crítico para

garantizar la seguridad y la integridad estructural del muro en condiciones sísmicas.

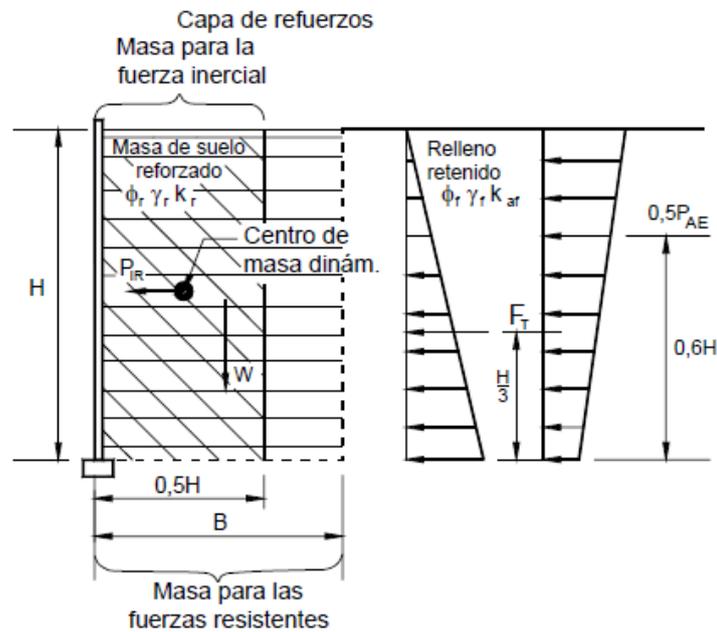


Ilustración 8: Análisis de Estabilidad Externa. Cargas Sísmicas Consideradas (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)

La ecuación presentada calcula la fuerza inercial  $PIR$ , generada por la aceleración del relleno reforzado en un evento sísmico. Aquí está la explicación detallada de cada uno de los términos de la ecuación:

- $PIR$ : es la Fuerza Inercial Resultante, generada por la aceleración del relleno reforzado durante un evento sísmico.
- $\gamma_{EQ}$ : es el Factor de Carga para las cargas EQ (sísmicas). Este factor ajusta la magnitud de la carga para tener en cuenta las condiciones sísmicas.
- $A_m$ : es el Máximo Coeficiente de Aceleración del muro en su centro de gravedad, o baricentro. Este coeficiente

representa la máxima aceleración que el muro puede soportar sin fallar durante un evento sísmico.

- g: es la Aceleración de la Gravedad, que tiene un valor aproximado de 9.81 m/sec<sup>2</sup>.
- $\gamma_s$ : es la Densidad del Suelo, medida en kilogramos por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>). Esta densidad puede variar dependiendo del tipo de suelo.
- H: es la Altura del Muro de Tierra Armada, medida en metros (m). Esta es la altura total del muro desde su base hasta su parte superior.

#### **4.1.4.3.9 Estado límite de resistencia**

Según las directrices del código AASHTO, el diseño de muros de tierra estabilizados mecánicamente debe considerar varios estados límite o condiciones de carga, garantizando el cumplimiento de la siguiente ecuación para cada uno de estos estados:

$$\sum \eta_i \cdot \gamma_i \cdot Q_i \leq \phi \cdot R_n$$

Aquí, cada término tiene el siguiente significado:

- $\gamma_i$ : Es el Factor de Carga correspondiente a un estado límite específico. Esta cifra ajusta la magnitud de la carga para tener en cuenta la variabilidad y la incertidumbre de las condiciones de carga.
- $\phi$ : Es el Factor de Resistencia relacionado con un estado límite específico. Este factor tiene en cuenta la variabilidad y la incertidumbre de la resistencia del material y la eficacia del diseño de la estructura.

- $Q_i$ : Es la carga considerada en el análisis. Esta puede ser cualquier carga aplicada a la estructura, incluyendo cargas estáticas, cargas dinámicas, cargas de viento, cargas de terremoto, etc.
- $R_n$ : Es la Resistencia Nominal, que es la resistencia máxima que puede soportar la estructura bajo condiciones ideales.
- $\eta_i$ : Es el Modificador de Carga, que ajusta la magnitud de la carga en función de su efecto en la estructura.

El análisis de la estabilidad del muro de Tierra Armada se llevará a cabo considerando los siguientes estados límite, definidos por el código AASHTO [C-3.4.1]:

- Resistencia I: Este es un estado límite que se refiere a la combinación de cargas que podrían causar el fallo estructural del muro. Esta combinación no considera específicamente el tipo de vehículos que transitarán por la estructura.
- Evento Extremo I: Este estado límite se refiere a la combinación de cargas que la estructura debe ser capaz de soportar durante un evento sísmico.

En base a esto, para cada nivel se debe verificar la capacidad de resistencia al arranque de los refuerzos y su nivel de tracciones. Esto asegura que la estructura puede soportar las cargas aplicadas sin sufrir fallos o desplazamientos inaceptables.

#### **4.1.4.3.10 Factores de carga y resistencia**

Para el análisis de los estados límites y la implementación del diseño de los muros de tierra armada, es necesario considerar ciertos factores de carga y resistencia de acuerdo con el código AASHTO. Estos factores ajustan las cargas y resistencias nominales para reflejar las incertidumbres y variabilidades en las condiciones de carga y resistencia del material. Los factores específicos a considerar para cada estado límite son:

##### **Resistencia I**

Factores de Carga para Verificación por Arranque de Refuerzos (Pullout):

- Empuje vertical del muro TEM (EV): 1.35 [T-3.4.1-2]
- Presión lateral del terreno (EH): 1.50 [T-3.4.1-2]
- Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM (LS): 1.75 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido (LS): 1.75 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga del relleno sobre el muro y relleno retenido (ES): 1.50 [T-3.4.1-1]
- Carga muerta (DL): 0.90 [T-3.4.1-1]

Factores de Carga para Verificación por Tracción Máxima en Refuerzos:

- Empuje vertical del muro TEM (EV): 1.35 [T-3.4.1-2]
- Presión lateral del terreno (EH): 1.50 [T-3.4.1-2]

- Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM (LS): 1.35 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido (LS): 1.35 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga del relleno (ES): 1.50 [T-3.4.1-1]
- Carga muerta (DL): 1.50 [T-3.4.1-1]

Factores de Resistencia (para ambos casos):

- Resistencia a tracción del refuerzo ( $\phi$ ): 0.90 [T-11.5.6-1]
- Resistencia a arranque del refuerzo ( $\phi$ ): 0.90 [T-11.5.6-1]

### **Evento Extremo I**

Factores de Carga para Verificación por Arranque de Refuerzos:

- Empuje vertical del muro TEM (EV): 1.35 [T-3.4.1-2]
- Presión lateral del terreno (EH): 1.50 [T-3.4.1-2]
- Cargas sísmicas (EQ): 1.00 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM (LS): 0.50 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido (LS): 0.50 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga del relleno (ES): 1.50 [T-3.4.1-1]
- Carga muerta (DL): 0.90 [T-3.4.1-1]

Factores de Carga para Verificación por Tracción Máxima en Refuerzos:

- Empuje vertical del muro TEM (EV): 1.35 [T-3.4.1-2]
- Presión lateral del terreno (EH): 1.50 [T-3.4.1-2]
- Cargas sísmicas (EQ): 1.00 [T-3.4.1-1]

- Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM (LS): 0.50 [T-3.4.1-1]
- Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido (LS): 0.50 [T-3.4.1-1]
- Carga muerta (DL): 1.50 [T-3.4.1-1]

Factores de Resistencia (para ambos casos):

- Resistencia a tracción del refuerzo ( $\phi$ ): 1.20 [T-11.5.6-1]
- Resistencia a arranque del refuerzo ( $\phi$ ): 1.20 [T-11.5.6-1]

Estos factores son necesarios para analizar la seguridad y la eficiencia de los muros de tierra armada en diferentes condiciones y situaciones.

#### **4.1.5. Análisis de Estabilidad**

El análisis de estabilidad interna de un muro de Tierra Armada Mecánicamente Estabilizada (TEM) implica evaluar la superficie de falla dentro del cuerpo reforzado del suelo. Este análisis asegura que las tensiones entre la masa de suelo y el refuerzo se mantengan seguras a lo largo de las diferentes alturas del refuerzo.

Los principales modos de falla considerados en este análisis de estabilidad interna son:

- Falla por elongación o ruptura del refuerzo: Esto puede ocurrir cuando las fuerzas de tensión dentro del cuerpo del suelo son lo suficientemente grandes como para causar una elongación excesiva o una ruptura del refuerzo. Esto puede resultar en grandes desplazamientos y el posible colapso de la estructura.
- Falla por arranque (Pullout): Esto puede suceder cuando las fuerzas de tensión en los elementos de refuerzo superan la adherencia del relleno al

refuerzo. En otras palabras, las fuerzas de tensión son más grandes que la fuerza necesaria para extraer el refuerzo de la masa de suelo reforzada.

Es importante destacar que para el cálculo de la falla por elongación o ruptura, se utiliza la sobrecarga de tráfico tanto en la parte superior como detrás del cuerpo reforzado del suelo. Sin embargo, para el cálculo de la falla por arranque, solo se considera la sobrecarga de tráfico detrás (y no encima) del cuerpo reforzado del suelo. Esto se hace para tener en cuenta las condiciones más desfavorables para el análisis.

Las fuerzas de tracción en cada nivel de refuerzo se determinan calculando la presión vertical equivalente en cada nivel, y luego la presión horizontal que actúa sobre el refuerzo. La presión vertical resultante en cada nivel de refuerzo depende de la presión vertical debido al peso propio del material de relleno que está por encima del nivel del refuerzo a analizar y de la sobrecarga a utilizar.

El esfuerzo horizontal al que se somete cada nivel de refuerzo se obtiene multiplicando la presión vertical por el coeficiente de empuje horizontal del suelo, de acuerdo con el método simplificado AASHTO.

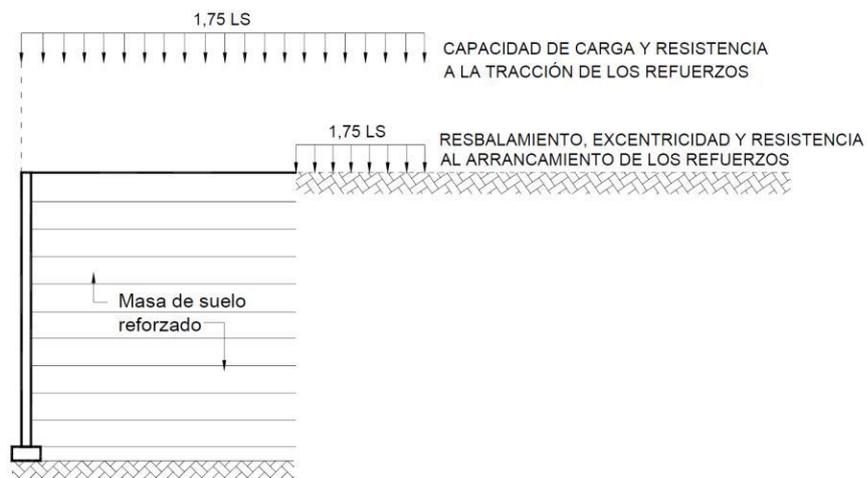


Ilustración 9: Sobrecarga de Tránsito según Modos de Falla Considerados (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)

Según la experiencia internacional de Tierra Armada y basándose en los ensayos realizados por el grupo para el caso de Muros TEM utilizando el tipo de refuerzo "cinta polimérica", se considera que el comportamiento que gobierna el cálculo para la estabilidad interna es del tipo inextensible.

El punto de máxima tensión en cada nivel de refuerzo divide el material de relleno en dos partes: una zona activa entre el panel y la línea de máxima tensión, y una zona resistente detrás de la línea de máxima tensión. El efecto global es que las fuerzas de tensión generadas en el refuerzo por la masa de suelo en la zona activa son transferidas al suelo en la zona pasiva a través de la fricción generada con el refuerzo.

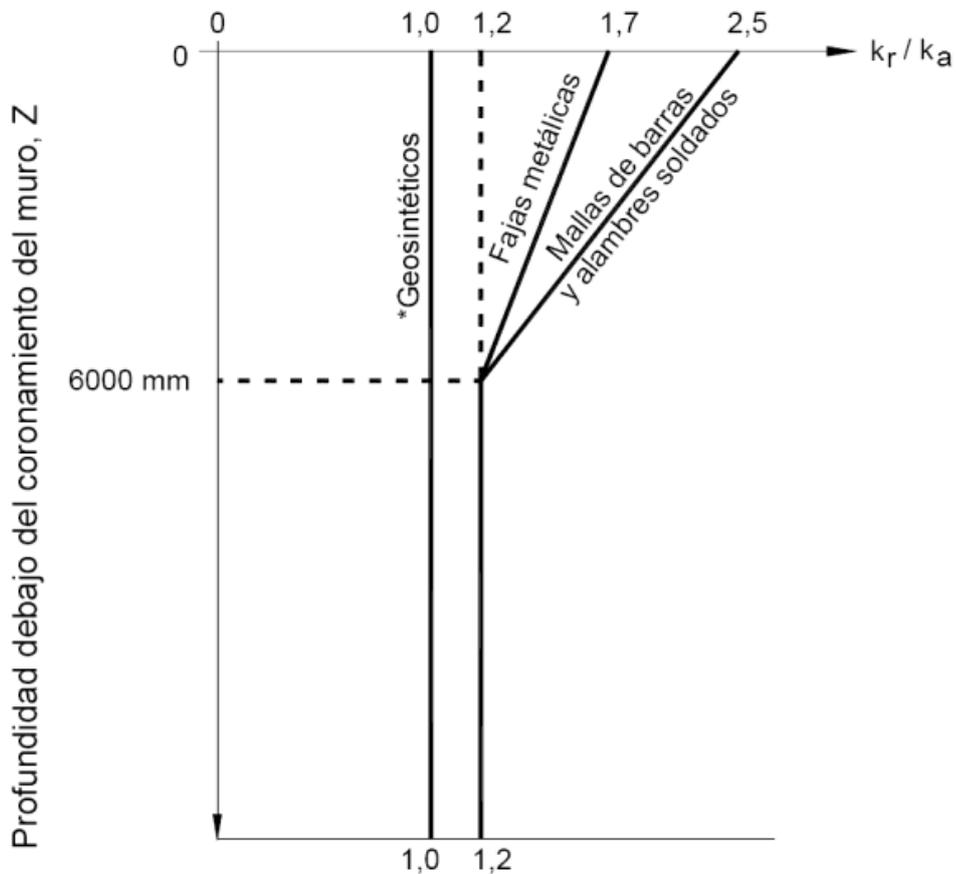


Ilustración 10: Coeficientes Referenciales de empuje horizontal al interior del macizo de Suelo Reforzado (Fuente: método AASHTO "Simplified Method").

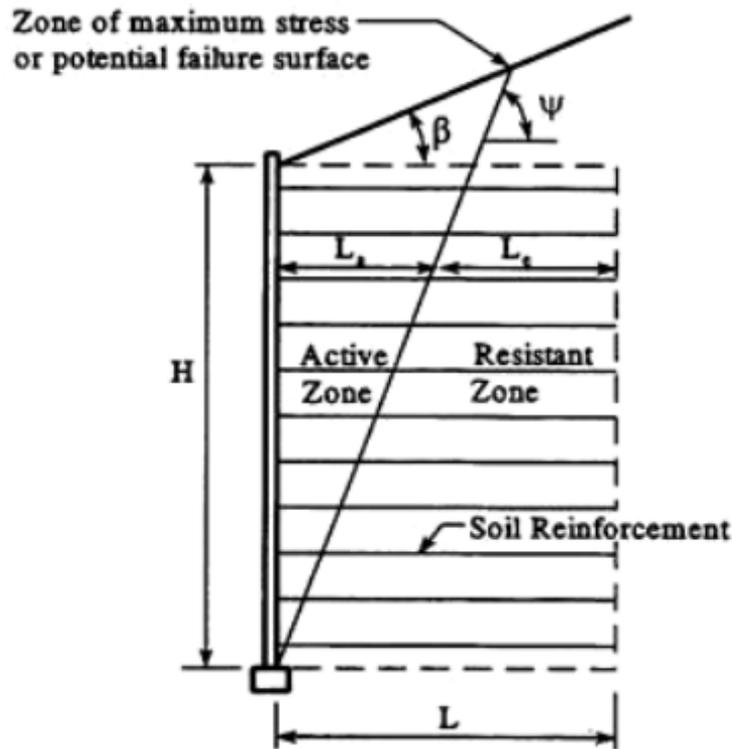


Ilustración 11: Línea de Tensión Máxima (Fuente: FREYSSINET TIERRA ARMADA)

#### 4.1.5.1. Consideraciones Sísmicas

Para el análisis de estabilidad interna bajo condiciones sísmicas, la ubicación de la línea de máxima tensión en los refuerzos es la misma que en el caso estático. Por lo tanto, para establecer los efectos dinámicos en el muro TEM, solo se necesita incorporar una fuerza de inercia,  $P_i$ , que se determina multiplicando el coeficiente de aceleración sísmica horizontal,  $A_m$ , por la masa de la zona activa.

El incremento de tensiones,  $T_{md}$ , en cada nivel "i" de los refuerzos para el caso sísmico se establece mediante una distribución ponderada de la carga de inercia,  $P_i$ , según las áreas resistentes de cada nivel, como se muestra a continuación:

$$T_{md} = \gamma \cdot P_i \cdot \frac{L_{ei}}{\sum_{i=1}^m L_{ei}}$$

Donde:

- $\gamma$  es el factor de mayoración para las cargas sísmicas EQ, que es igual a 1.00
- $P_i$  es la carga de inercia,
- $L_{ei}$  es la longitud efectiva de los refuerzos de la capa  $i$ ,
- $m$  es el número total de niveles de refuerzos.

En consecuencia, la sollicitación total "Ttotal" en el refuerzo ubicado en el nivel "i" se determina de la siguiente manera:

$$T_{Total} = T_{Max} + T_{md}$$

#### 4.1.5.2. Resistencia del refuerzo para consideraciones sísmicas

Para condiciones sísmicas, la capacidad máxima de tracción del refuerzo, representada por  $\phi \cdot T_{nom}$ , debe ser mayor que las componentes estáticas y sísmicas en cada nivel de refuerzo. Esto se indica de la siguiente manera:

$$\phi \cdot T_{nom} > \text{Componente estática} + \text{Componente sísmica}$$

$$T_{total} = T_{max} + T_{md} \leq \phi \cdot T_{nom}$$

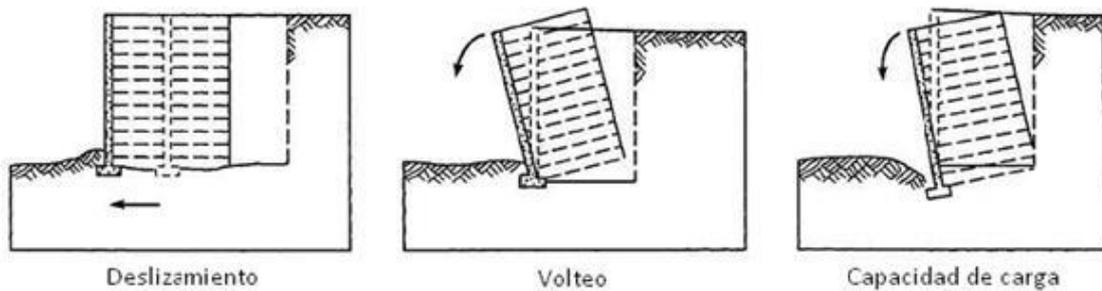
Donde:

- $\Phi$ : Factor de reducción de resistencia para condición sísmica = 1.20

#### 4.1.6. Análisis de estabilidad externa

En la evaluación de la Estabilidad Externa, el macizo se considera como un bloque rígido, definido por la altura y longitud de los refuerzos. Los modos de

falla considerados en este análisis involucran límites de excentricidad, deslizamiento y las presiones de contacto en la fundación. Según los estados límite considerados, la norma AASHTO LRFD 2010 define las verificaciones que deben realizarse, como se muestra en la ilustración.



*Ilustración 12: Definición de las Distintas Condiciones de Falla Consideradas*

Es importante señalar que la ubicación de la sobrecarga para los cálculos de estabilidad externa dependerá del tipo de verificación que se está realizando. En las siguientes secciones, se destacan algunos aspectos que se consideraron en las verificaciones de las condiciones de falla mencionadas anteriormente.

## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

### 4.2.1. Causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera

*Tabla 5: Encuesta sobre los deslizamientos en la carretera*

Preguntas	Promedio de Dimensión
En una escala del 1 al 5, ¿qué tan frecuentes consideras que son los deslizamientos ocurridos en la carretera Ninacaca – Huachon durante los últimos cinco años?	2
En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificarías la magnitud aproximada de los deslizamientos ocurridos en la carretera Ninacaca – Huachon?	3
En una escala del 1 al 5, ¿qué tan efectivas consideras que han sido las medidas de mitigación o refuerzo de suelos implementadas hasta la fecha?	2

¿Qué nivel de conocimiento tienes sobre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon?	1
En una escala del 1 al 5, ¿cuán importante crees que es el tipo de suelo y su capacidad de drenaje en la ocurrencia de deslizamientos?	3
En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificarías la magnitud de los daños y deformaciones específicas en las plataformas viales debido a los deslizamientos?	1
En una escala del 1 al 5, ¿qué tan confiado te sientes respecto a la efectividad de las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales?	1
En una escala del 1 al 5, ¿cómo evaluarías el impacto económico y social de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon?	1

Para realizar un análisis de los resultados obtenidos en la encuesta, podemos calcular el promedio de cada dimensión (pregunta) y analizar cómo los participantes perciben cada aspecto relacionado con las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon. El análisis nos permitirá identificar las áreas que pueden requerir mayor atención o mejora, siendo:

1. En una escala del 1 al 5, ¿qué tan frecuentes consideras que son los deslizamientos ocurridos en la carretera Ninacaca – Huachon durante los últimos cinco años? -> Promedio: 2 Comentarios: Los participantes en promedio consideran que los deslizamientos han sido poco frecuentes durante los últimos cinco años.
2. En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificarías la magnitud aproximada de los deslizamientos ocurridos en la carretera Ninacaca – Huachon? -> Promedio: 3 Comentarios: Los participantes en promedio califican los deslizamientos como de magnitud mediana.

3. En una escala del 1 al 5, ¿qué tan efectivas consideras que han sido las medidas de mitigación o refuerzo de suelos implementadas hasta la fecha? -  
> Promedio: 2 Comentarios: Los participantes en promedio consideran que las medidas de mitigación o refuerzo de suelos han sido inefectivas hasta la fecha.
4. ¿Qué nivel de conocimiento tienes sobre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon? -> Promedio: 1  
Comentarios: Los participantes en promedio tienen un nivel muy bajo de conocimiento sobre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera.
5. En una escala del 1 al 5, ¿cuán importante crees que es el tipo de suelo y su capacidad de drenaje en la ocurrencia de deslizamientos? -> Promedio: 3  
Comentarios: Los participantes en promedio consideran que el tipo de suelo y su capacidad de drenaje son de importancia neutral en la ocurrencia de deslizamientos.
6. En una escala del 1 al 5, ¿cómo calificarías la magnitud de los daños y deformaciones específicas en las plataformas viales debido a los deslizamientos? -> Promedio: 1  
Comentarios: Los participantes en promedio califican los daños y deformaciones como muy leves en las plataformas viales debido a los deslizamientos.
7. En una escala del 1 al 5, ¿qué tan confiado te sientes respecto a la efectividad de las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales? -> Promedio: 1  
Comentarios: Los participantes en promedio no muestran confianza en la efectividad de las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales.

8. En una escala del 1 al 5, ¿cómo evaluarías el impacto económico y social de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon?

-> Promedio: 1 Comentarios: Los participantes en promedio consideran que el impacto económico y social de los deslizamientos en la zona es muy bajo.

- En general, los participantes perciben que los deslizamientos han sido poco frecuentes y de magnitud mediana durante los últimos cinco años.
- Existe una percepción negativa sobre la efectividad de las medidas de mitigación o refuerzo de suelos implementadas hasta la fecha.
- Los participantes tienen un bajo nivel de conocimiento sobre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos.
- La importancia del tipo de suelo y su capacidad de drenaje en la ocurrencia de deslizamientos se considera neutra.
- Se percibe que los daños y deformaciones en las plataformas viales debido a los deslizamientos son muy leves.
- Los participantes no muestran confianza en la efectividad de las tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales.
- Se considera que el impacto económico y social de los deslizamientos en la zona es muy bajo.

Luego de tener la perspectiva de las encuestas respecto a los deslizamientos, en base a un análisis se ha determinado:

Tabla 6: Causas Geotecnicas y geológicas (Fuente: Propio)

<b>Causas de Deslizamientos en la Carretera Ninacaca - Huachon</b>	<b>Posible Relación con los Deslizamientos</b>
<b>Tipo de Suelo</b>	Presencia de suelos inestables o poco cohesivos que facilitan los deslizamientos.
<b>Capacidad de Drenaje del Suelo</b>	Suelos con baja capacidad de drenaje pueden propiciar el aumento de la presión de agua y generar deslizamientos (Anexo informe de falta de drenaje)
<b>Pendientes Pronunciadas</b>	Laderas empinadas que aumentan la inestabilidad y la posibilidad de deslizamientos.
<b>Presencia de Fallas Geológicas</b>	Fallas geológicas pueden debilitar el terreno y contribuir a la ocurrencia de deslizamientos.
<b>Precipitaciones Intensas y Persistentes</b>	Lluvias intensas y prolongadas pueden saturar el suelo y desencadenar deslizamientos.
<b>Actividades Antropogénicas (Construcción de Carretera, Minería)</b>	Alteraciones humanas en el terreno pueden cambiar las condiciones naturales y provocar deslizamientos.
<b>Erosión y Degradación del Suelo</b>	Pérdida de cobertura vegetal y malas prácticas agrícolas pueden contribuir a la erosión del suelo y desencadenar deslizamientos.

#### 4.2.2. Evaluación de deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon.

##### Evaluación y Cuantificación de Daños y Deformaciones en la Carretera Ninacaca – Huachon debido a Deslizamientos

##### 4.2.2.1. Inspección de Campo

El equipo de geólogos e ingenieros geotécnicos realiza una visita al sitio afectado por los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon. Durante la inspección, se identifican los siguientes aspectos:

- Ubicación y extensión de los deslizamientos: Se determina que los deslizamientos afectan el tramo de la carretera comprendido entre las progresivas 40+590 y 40+630.

- Tipo de deslizamiento: Se observan deslizamientos de tipo rotacional y translacional, que han causado erosión y pérdida de la plataforma en ciertas áreas.
- Daños en las plataformas viales: Se registran diferentes tipos de daños, incluyendo hundimientos, grietas y deformaciones en el pavimento, así como rupturas y desplazamientos en los taludes de corte y relleno.



*Ilustración 13: Pérdida de la plataforma por deslizamiento de talud (fuente: Propio)*

#### **4.2.2.2. Muestreo y Ensayos:**

Se toman muestras de suelo y roca en las áreas afectadas por los deslizamientos para realizar ensayos de laboratorio. Los resultados de los ensayos proporcionan las siguientes propiedades geotécnicas:

- Coeficiente de fricción y ángulo de reposo del suelo.
- Resistencia al corte del suelo y cohesión.
- Porosidad y capacidad de drenaje del suelo.

#### **4.2.2.3. Análisis Geotécnico:**

Con los datos de la inspección de campo y los resultados de los ensayos de laboratorio, se realiza un análisis geotécnico para comprender las causas de los deslizamientos. Se determina lo siguiente:

- Las principales causas de los deslizamientos son la erosión del agua superficial proveniente de la alcantarilla del km 37+875 y la pérdida de la plataforma debido a condiciones geotécnicas desfavorables del suelo en el tramo 40+480 al km 40+640.
- El suelo en el área afectada tiene un bajo coeficiente de fricción y ángulo de reposo, lo que contribuye a la inestabilidad del terreno.
- La capacidad de drenaje del suelo es deficiente, lo que favorece la acumulación de agua y la aparición de deslizamientos.

#### **4.2.2.4. Evaluación de Daños en las Plataformas Viales:**

Se evalúan los daños en las plataformas viales en base a inspecciones visuales y mediciones topográficas. Se cuantifican los siguientes daños:

- Hundimientos del pavimento: Se identifican hundimientos localizados en varios puntos del tramo afectado.
- Grietas en el pavimento: Se registran grietas longitudinales y transversales en el pavimento debido a movimientos del suelo.
- Deformaciones en los taludes: Se detectan deformaciones y desplazamientos en los taludes de corte y relleno.
- Pérdida de la plataforma

#### **4.2.2.5. Propuesta de Soluciones:**

Considerando los resultados del análisis geotécnico y la evaluación de daños, se proponen las siguientes medidas de mitigación y refuerzo:

- Estabilización de taludes: Se recomienda la construcción de muros de contención mediante el uso de sistemas Terramesh y mallas geotécnicas uniaxiales para mejorar la estabilidad de los taludes.
- Mejora de drenaje: Se propone la implementación de sistemas de drenaje para controlar el flujo de agua y reducir la presión intersticial en el suelo.
- Reforzamiento del pavimento: Se sugiere el uso de técnicas de refuerzo de pavimentos, como el empleo de geotextiles y geogrelhas, para aumentar la resistencia y durabilidad del pavimento.

#### Datos Geológicos:

- Coeficiente de fricción del suelo: 0.25 (valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio).
- Ángulo de reposo del suelo: 25 grados (valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio).
- Resistencia al corte del suelo: 120 kPa (valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio).
- Cohesión del suelo: 20 kPa (valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio).
- Porosidad del suelo: 35% (valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio).
- Capacidad de drenaje del suelo: 0.02 cm/s (valor promedio obtenido en ensayos de laboratorio).

#### 4.2.3. Consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachón.

Tabla 7: Consecuencias Económicas y Sociales de los deslizamientos (Fuente: Propio)

Consecuencias	Descripción
<b>Interrupción del tránsito vehicular</b>	Los deslizamientos han provocado bloqueos en la carretera, lo que ha generado la interrupción del tráfico vehicular. Esto afecta el transporte de personas y mercancías, dificultando el acceso a servicios y afectando el comercio local.
<b>Daños a vehículos y carga</b>	Los hundimientos y grietas en el pavimento han causado daños en vehículos que circulaban por la carretera, así como en la carga transportada. Los costos de reparación y reposición de vehículos y mercancías afectan a los conductores y empresas de transporte.
<b>Costos de mantenimiento y reparación</b>	Los daños en la infraestructura vial requieren de trabajos de mantenimiento y reparación adicionales, lo que representa un gasto adicional para el mantenimiento de la carretera.
<b>Pérdida de productividad</b>	La interrupción del tráfico y los desvíos causados por los deslizamientos generan demoras en los tiempos de viaje, lo que afecta la productividad de las personas y las empresas que utilizan la carretera para sus actividades diarias.
<b>Impacto en el turismo</b>	La inaccesibilidad de la carretera afecta al turismo en la zona, ya que dificulta el acceso a lugares turísticos y disminuye el flujo de visitantes. Esto repercute en los ingresos de los negocios locales relacionados con el turismo.
<b>Riesgo para la población</b>	Los deslizamientos representan un riesgo para la seguridad de la población que vive en la zona cercana a la carretera. La posibilidad de deslizamientos adicionales pone en peligro a las comunidades aledañas.
<b>Impacto en la economía local</b>	La carretera afectada es una importante vía de transporte para la economía local, incluyendo la agricultura y la minería. Los deslizamientos afectan la movilización de productos y materias primas, impactando negativamente en la economía de la región.
<b>Costos de rehabilitación</b>	Los trabajos de estabilización y reparación de los deslizamientos implican costos significativos para el Estado o las entidades responsables de la carretera. Estos gastos adicionales deben ser considerados en el presupuesto de la obra.

Además, el presupuesto para la solución del deslizamiento mas critico tiende a ser:

Tabla 8: Presupuesto de solución Técnica (Fuente: CVNH)

TEM	PRESUPUESTO (S/)
- Costo Directo	967,413.64
- Gastos Generales	88,508.55
- Utilidad (10.00%)	96,741.36
<b>Subtotal</b>	<b>1,152,663.55</b>
<b>IGV (18%)</b>	<b>207,479.44</b>
<b>TOTAL,</b>	<b>1,360,142.99</b>

El presupuesto total para la solución del deslizamiento más crítico, que incluye las partidas adicionales no consideradas en el Expediente Técnico Original, es de S/ 1,360,142.99 (Un Millón Trescientos Sesenta Mil Ciento Cuarenta y Dos con 99/100 nuevos soles). Este monto representa el 1.546% del monto total del contrato inicial.

A continuación, se presenta un cuadro con el detalle de las partidas y su metrado total para las actividades del "MURO TEM TERRAGABION KM 40+590 AL KM 40+630":

ITEM	PARTIDA / DESCRIPCION	UND.	METRADO TOTAL
<b>1</b>	<b>OBRAS PRELIMINARES</b>		
<b>1.01</b>	MOVILIZACION DE EQUIPOS	GLB	1
<b>1.02</b>	TRAZO Y NIVELACION	m2	446.84
<b>2</b>	<b>MOVIMIENTO DE TIERRAS</b>		
<b>2.01</b>	CORTE EN MATERIAL SUELTO	m3	2,988.72
<b>2.02</b>	RELLENO CON MATERIAL DE PRESTAMO	m3	4,582.61
<b>3</b>	<b>TERRAGABION</b>		
<b>3.01</b>	TERRAGABION 0.50 m x 1.00 m x 4.00 m -0.5 m	m3	84
<b>3.02</b>	TERRAGABION 1.00 m x 1.00 m x 4.00 m -0.5 m	m3	204
<b>4</b>	<b>GEOMALLA UNIAXIAL</b>		
<b>4.01</b>	GEOMALLA UNI AXIAL	m2	4,002.00
<b>4.02</b>	GEOTEXTIL NO TEJIDO DE SEPARACION	m2	572.8
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE DRENAJE</b>		
<b>5.01</b>	FILTRO DRENANTE PIEDRA GRANDE DE 6" A 8"	m3	77.2
<b>5.02</b>	TUBERIA HDPE DOBLE PERFORADA DE 6"	m	34.27

<b>5.03</b>	TUBERIA HDPE DOBLE SIN PERFORAR DE 6"	m	37.16
<b>5.04</b>	CODO HDPE 90°	und	3
<b>5.05</b>	EMBOQUILLADOS ESCALONADOS		
<b>5.05.01</b>	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO	m2	356.98
<b>5.05.02</b>	EMBOQUILLADO DE PIEDRA	m3	104.61
<b>6</b>	TRANSPORTE		
<b>6.01</b>	TRANSPORTE DE RELLENO CON MATERIAL DE PRESTAMO D<=1 km	m3k	4,582.61
<b>6.02</b>	TRANSPORTE DE RELLENO CON MATERIAL DE PRESTAMO D>1 km	m3k	43,383.03
<b>6.03</b>	TRANSPORTE DE MATERIAL EXCEDENTE D<=1 km	m3k	2,988.72
<b>6.04</b>	TRANSPORTE DE MATERIAL EXCEDENTE D>1 km	m3k	20,143.76

1. OBRAS PRELIMINARES 1.01 MOVILIZACION DE EQUIPOS (GLB - Global)

Descripción: Esta actividad comprende la movilización de maquinaria, equipos y herramientas necesarias para iniciar los trabajos del proyecto en el área designada. Incluye el traslado de los equipos desde su ubicación actual hasta el sitio de la obra.

1.02 TRAZO Y NIVELACION (m2 - Metro cuadrado) Descripción: En esta etapa se realiza el trazo y nivelación del terreno en la zona donde se llevarán a cabo las obras. Se marcan los límites del proyecto y se establecen las cotas y pendientes requeridas para la correcta ejecución de las siguientes actividades.

2. MOVIMIENTO DE TIERRAS 2.01 CORTE EN MATERIAL SUELTO (m3 -

Metro cúbico) Descripción: Esta actividad implica la remoción y extracción de material suelto, que no es adecuado para soportar las estructuras previstas en el proyecto. Se realiza con maquinaria especializada para garantizar la estabilidad del terreno.

2.02 RELLENO CON MATERIAL DE PRESTAMO (m3 - Metro cúbico)

Descripción: En esta actividad se realiza el relleno con material proveniente de préstamos cercanos a la obra. El material debe cumplir con las especificaciones técnicas para asegurar una adecuada compactación y resistencia.

3. TERRAGABION 3.01 TERRAGABION 0.50 m x 1.00 m x 4.00 m -0.5 m (m3 - Metro cúbico) Descripción: Se refiere a la construcción de estructuras tipo terramesh o terragabiones, que consisten en celdas rellenas de piedras y protegidas con una geomalla. Estas estructuras se utilizan para estabilizar taludes o laderas.

3.02 TERRAGABION 1.00 m x 1.00 m x 4.00 m -0.5 m (m3 - Metro cúbico)

Descripción: Similar a la actividad anterior, pero en este caso se construyen terragabiones de dimensiones diferentes, lo que puede responder a necesidades específicas de estabilización en diferentes áreas del proyecto.

4. GEOMALLA UNIAXIAL 4.01 GEOMALLA UNIAXIAL (m2 - Metro cuadrado)

Descripción: La geomalla uniaxial es una malla sintética que se utiliza para reforzar el suelo y mejorar su capacidad de carga. Se coloca estratégicamente en áreas donde se requiere mayor resistencia.

4.02 GEOTEXTIL NO TEJIDO DE SEPARACION (m2 - Metro cuadrado)

Descripción: El geotextil no tejido actúa como una barrera entre diferentes capas del terreno, evitando la mezcla de materiales y mejorando la estabilidad del suelo.

5. SISTEMA DE DRENAJE 5.01 FILTRO DRENANTE PIEDRA GRANDE DE 6"

A 8" (m3 - Metro cúbico) Descripción: Este material de drenaje consiste en piedras de gran tamaño que se utilizan en los sistemas de drenaje para facilitar el flujo del agua y evitar la acumulación en zonas no deseadas.

5.02 TUBERIA HDPE DOBLE PERFORADA DE 6" (m - Metro lineal)

Descripción: Se refiere a la instalación de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) que están perforadas para permitir el drenaje del agua hacia los puntos deseados.

5.03 TUBERIA HDPE DOBLE SIN PERFORAR DE 6" (m - Metro lineal)

Descripción: Similar a la actividad anterior, pero en este caso, las tuberías no están perforadas, lo que las hace aptas para transportar agua o líquidos sin permitir el drenaje.

5.04 CODO HDPE 90° (und - Unidad) Descripción: Son accesorios utilizados

en las tuberías HDPE para crear curvas de 90 grados en el sistema de drenaje, permitiendo el cambio de dirección del flujo de agua.

6. TRANSPORTE 6.01 TRANSPORTE DE RELLENO CON MATERIAL DE

PRESTAMO  $D \leq 1$  km (m<sup>3</sup>k - Metro cúbico por kilómetro) Descripción: Esta actividad incluye el transporte del material de préstamo desde la fuente cercana a la obra hasta el lugar de relleno con una distancia menor o igual a 1 kilómetro.

6.02 TRANSPORTE DE RELLENO CON MATERIAL DE PRESTAMO  $D > 1$

km (m<sup>3</sup>k - Metro cúbico por kilómetro) Descripción: Similar a la actividad anterior, pero en este caso, se transporta el material de préstamo a distancias mayores de 1 kilómetro.

6.03 TRANSPORTE DE MATERIAL EXCEDENTE  $D \leq 1$  km (m<sup>3</sup>k - Metro

cúbico por kilómetro) Descripción: Esta actividad involucra el transporte del material excedente que se ha removido durante las actividades de movimiento de tierras y corte del material suelto. La distancia de transporte es menor o igual a 1 kilómetro.

6.04 TRANSPORTE DE MATERIAL EXCEDENTE D>1 km (m3k - Metro cúbico por kilómetro) Descripción: Similar a la actividad anterior, pero en este caso, el transporte del material excedente se realiza a distancias mayores de 1 kilómetro.

#### 4.2.4. Tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales

<b>Tecnología de Refuerzo de Suelos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación en el caso explicado</b>
<b>Terragabiones</b>	Los terragabiones son estructuras modulares formadas por celdas de alambre rellenas de piedras. Estos elementos se ensamblan para formar muros de contención y estabilización de taludes y laderas.	En el caso explicado, se utilizan terragabiones para la construcción de un muro de contención en la zona afectada por deslizamientos (KM 40+590 al KM 40+630). La estructura de terragabiones proporciona estabilidad y resistencia al talud erosionado, permitiendo la recuperación de la plataforma vial.
<b>Geomallas Uniaxiales</b>	Las geomallas uniaxiales son láminas de material sintético de alta resistencia y baja deformación que se utilizan para reforzar el suelo. Se colocan en el terreno para distribuir las cargas y mejorar la capacidad portante del suelo.	En el caso explicado, se emplean geomallas uniaxiales para mejorar la estabilidad interna del relleno en el área afectada por los deslizamientos. Las geomallas evitan la propagación de tensiones y contribuyen a la recuperación de la plataforma vial.
<b>Geotextiles</b>	Los geotextiles son telas permeables y resistentes utilizadas para separar, filtrar, drenar o reforzar diferentes capas del suelo. Pueden utilizarse en combinación con otras tecnologías de refuerzo.	En el caso explicado, los geotextiles pueden emplearse junto con las geomallas uniaxiales para mejorar la capacidad de drenaje y filtración del terreno, evitando la acumulación de agua y su posterior infiltración en el suelo.
<b>Sistemas de Drenaje</b>	Los sistemas de drenaje incluyen la instalación de tuberías, filtros y materiales drenantes para evacuar el agua y evitar su acumulación en zonas críticas.	En el caso explicado, se utilizan sistemas de drenaje para controlar la infiltración del agua y garantizar una correcta gestión de las aguas superficiales y subterráneas, contribuyendo así a la estabilidad del suelo y la plataforma vial.

En el proyecto de construcción de la carretera Ninacaca – Huachon, se han empleado diversas tecnologías de refuerzo de suelos con el objetivo de

mitigar los efectos devastadores de los deslizamientos y estabilizar las plataformas viales afectadas. Entre las tecnologías implementadas, destacan los terragabiones, las geomallas uniaxiales, los geotextiles y los sistemas de drenaje.

Los terragabiones se presentan como una solución ingeniosa y versátil, conformada por celdas modulares de alambre galvanizado o acero recubierto que son rellenas con piedras. Estas estructuras se utilizan para construir muros de contención y estabilización en taludes y laderas. En el caso de esta carretera, se han utilizado terragabiones para crear un sólido muro de contención en el tramo afectado por los deslizamientos entre el KM 40+590 al KM 40+630. Estos terragabiones ofrecen una poderosa resistencia a las fuerzas externas, como la presión del suelo y la erosión causada por el agua. Gracias a su facilidad de instalación y durabilidad, los terragabiones se erigen como una opción confiable y sostenible para estabilizar el talud erosionado y permitir la recuperación segura de la plataforma vial.

Otra tecnología empleada son las geomallas uniaxiales, láminas estructurales fabricadas con materiales sintéticos de alta resistencia y baja deformación, como el poliéster o el polipropileno. Las geomallas se disponen en el terreno a lo largo del talud o ladera, integrándose con el suelo circundante mediante su apertura uniaxial. Esta configuración les permite distribuir las cargas de forma uniforme y mejorar la capacidad portante del suelo. En el caso explicado, las geomallas uniaxiales han sido utilizadas para reforzar el suelo en el área afectada por los deslizamientos, reduciendo la propagación de tensiones y proporcionando mayor estabilidad al terreno. Esta tecnología juega un papel fundamental en la recuperación de la plataforma vial y previene la aparición de nuevos deslizamientos.

Los geotextiles, por su parte, son telas permeables y resistentes, fabricadas con materiales como poliéster o polipropileno. Estas telas se emplean

en diversas aplicaciones geotécnicas, y en este caso, se utilizan en combinación con las geomallas uniaxiales. Los geotextiles se emplean para mejorar la capacidad de drenaje y filtración del terreno, evitando la acumulación de agua y permitiendo su rápida evacuación. Al reducir la presión hidrostática en el suelo, los geotextiles contribuyen a la estabilización del terreno y ayudan a prevenir futuros deslizamientos.

Por último, los sistemas de drenaje completan la estrategia de recuperación de las plataformas viales afectadas. Estos sistemas incluyen la instalación de tuberías, filtros y materiales drenantes para evacuar el agua y evitar su acumulación en zonas críticas. En el caso de la carretera Ninacaca – Huachon, los sistemas de drenaje se han implementado para controlar la infiltración del agua y garantizar una correcta gestión de las aguas superficiales y subterráneas en el área afectada por deslizamientos. La presencia de sistemas de drenaje adecuados contribuye de manera significativa a la reducción de la presión hidrostática en el suelo, mejorando su estabilidad y asegurando la durabilidad de las soluciones de refuerzo utilizadas.

#### **4.2.5. Viabilidad Técnica Y Económica**

La viabilidad técnica y económica del proyecto de Adicional de Obra N°02 "MURO TEM TERRAGABION KM 40+590 AL KM 40+630" en la carretera Ninacaca – Huachon debe ser evaluada cuidadosamente para asegurar que cumple con los requisitos establecidos por el Reglamento de la Ley de Contrataciones del Estado y garantizar el éxito y la sostenibilidad de la intervención.

Desde el punto de vista técnico, las tecnologías seleccionadas, como los terragabiones, geomallas uniaxiales, geotextiles y sistemas de drenaje, han demostrado ser soluciones efectivas para la estabilización de taludes y la recuperación de plataformas viales afectadas por deslizamientos. Los

terragabiones proporcionan una estructura sólida y resistente, mientras que las geomallas uniaxiales refuerzan el suelo y evitan la propagación de tensiones. Los geotextiles y sistemas de drenaje contribuyen a mejorar la capacidad de drenaje y filtración del terreno, reduciendo la presión hidrostática y previniendo futuros deslizamientos. La combinación de estas tecnologías se alinea con las mejores prácticas de ingeniería geotécnica y brinda confianza en su eficacia para abordar los problemas geotécnicos presentes en el tramo de la carretera afectado.

Desde el punto de vista económico, el presupuesto de la prestación adicional ha sido cuidadosamente elaborado y representa el 1.546 % del monto total del contrato. Este porcentaje se encuentra dentro del límite establecido por el Reglamento de la Ley de Contrataciones del Estado, que establece que la incidencia de trabajos adicionales no debe superar el 15%. El costo directo, los gastos generales y la utilidad se han estimado con base en los precios a la fecha de la aprobación del presupuesto base, junio del 2021, lo que brinda una visión realista y actualizada de los costos involucrados en la ejecución del proyecto. El presupuesto incluye tanto las partidas directas relacionadas con la implementación de las tecnologías de refuerzo, como los gastos adicionales para asegurar la correcta ejecución y supervisión de los trabajos.

En conjunto, la viabilidad técnica y económica del proyecto es sólida y respaldada por la idoneidad de las tecnologías empleadas y el cumplimiento de los requerimientos financieros establecidos. El proyecto tiene el potencial de ofrecer resultados positivos, asegurando la recuperación de la carretera y su sostenibilidad a largo plazo. No obstante, se recomienda seguir monitoreando el desarrollo de las obras y la implementación de las tecnologías, así como considerar medidas de mitigación de riesgos adicionales para asegurar el éxito y la seguridad de la intervención. Con una planificación adecuada y una ejecución rigurosa, se espera que el proyecto logre su objetivo de restablecer la

funcionalidad y estabilidad de la carretera Ninacaca – Huachon en la zona afectada por los deslizamientos.

- Vida útil del proyecto: 10 años.
- Ingresos anuales generados por la carretera mejorada: S/. 800,000.
- Costos anuales de mantenimiento y operación de la carretera mejorada: S/. 100,000.

Flujos de caja anuales: Año 0 (Inversión inicial): S/. 3,457,004 (monto total del presupuesto). Años 1 al 10: Ingresos anuales - Costos anuales de mantenimiento y operación.

Calculemos los flujos de caja y realicemos el análisis de TIR y VAN:

Flujos de Caja: Año 0: -S/. 3,457,004 (Inversión inicial) Año 1: S/. 700,000 (S/. 800,000 - S/. 100,000) Año 2: S/. 700,000 Año 3: S/. 700,000 Año 4: S/. 700,000 Año 5: S/. 700,000 Año 6: S/. 700,000 Año 7: S/. 700,000 Año 8: S/. 700,000 Año 9: S/. 700,000 Año 10: S/. 700,000

Análisis de TIR y VAN:

1. Calcularemos el VAN utilizando la fórmula:

$$VAN = \sum [\text{Flujo de caja} / (1 + \text{Tasa de descuento})^n]$$

donde n es el número de años y  $\Sigma$  representa la suma.

$$VAN = [-S/. 3,457,004 / (1 + 0.10)^0] + [S/. 700,000 / (1 + 0.10)^1] + \dots + [S/. 700,000 / (1 + 0.10)^{10}]$$

$$VAN = [-S/. 3,457,004] + [S/. 636,363.64] + [S/. 578,512.40] + [S/. 525,919.45] + [S/. 478,108.59] + [S/. 434,553.27] + [S/. 394,763.88] + [S/. 358,293.53] + [S/. 324,731.39] + [S/. 293,709.44] + [S/. 264,907.68]$$

$$\text{VAN} = \text{S/}. 1,006,407.73$$

2. Calcularemos la TIR, que es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero.

Para esto, utilizamos un método numérico o una hoja de cálculo:

$$\text{TIR} \approx 18.6\% \text{ (aproximadamente)}$$

Análisis de Resultados:

- El VAN obtenido es S/. 1,006,407.73, lo cual indica que el proyecto es rentable y generaría un retorno positivo para la inversión inicial de S/. 3,457,004. Un VAN positivo sugiere que el proyecto agregaría valor económico a la empresa o entidad que lo implemente.
- La TIR obtenida es aproximadamente 18.6%, lo que significa que el proyecto tendría una tasa de retorno del 18.6% sobre la inversión inicial. Dado que la TIR (18.6%) es mayor que la tasa de descuento utilizada (10%), el proyecto sería considerado como aceptable desde el punto de vista financiero.

En conclusión, el análisis de TIR y VAN muestra que el proyecto en la carretera Ninacaca – Huachon es viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. Presenta una tasa de retorno atractiva y un valor actual neto positivo, lo que indica que sería una inversión rentable para la entidad responsable de la carretera.

### **4.3. Prueba de hipótesis**

#### **4.3.1. Prueba de Hipótesis 1**

- Hipótesis nula (H0): No existe una relación significativa entre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos y la afectación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon.

- Hipótesis alternativa (H1): Las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos afectan significativamente las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon, debilitando la estabilidad del suelo y generando desplazamientos y deformaciones.

Tabla 9: valores cuantitativos para representar las variables (Fuente Propio)

<b>Tramo</b>	<b>Pendiente del Terreno (Grados)</b>	<b>Índice de Plasticidad (IP)</b>	<b>Profundidad del Deslizamiento (metros)</b>	<b>Afectación de la Plataforma (cm)</b>
<b>1</b>	12	12	2.5	15
<b>2</b>	14	8	3.2	20
<b>3</b>	18	15	5.1	40
<b>4</b>	10	6	1.8	12
<b>5</b>	15	10	4	30
<b>6</b>	20	18	6.8	50
<b>7</b>	11	9	2.2	18
<b>8</b>	16	14	4.8	35
<b>9</b>	19	20	7.2	55
<b>10</b>	13	7	2.9	22

En este cuadro, hemos incluido datos más técnicos y específicos sobre cada tramo de la carretera. Las columnas representan:

1. Tramo: Número de identificación del tramo de la carretera evaluado.
2. Pendiente del Terreno (Grados): Angulo de inclinación del terreno en grados, un factor relevante en la estabilidad del suelo.
3. Índice de Plasticidad (IP): Indicador de la plasticidad del suelo, que mide su capacidad para cambiar de forma sin romperse.
4. Profundidad del Deslizamiento (metros): Profundidad a la que ha ocurrido el deslizamiento en el terreno.
5. Afectación de la Plataforma (cm): Medida de la afectación de la plataforma vial debido al deslizamiento, en centímetros.

Para probar las hipótesis, realizaremos un análisis estadístico utilizando una prueba de correlación entre las variables relacionadas con las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos y la afectación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon. En este caso, utilizaremos el coeficiente de correlación de Pearson para determinar si existe una relación significativa entre las variables.

Para realizar la prueba de correlación, asumiremos un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ). Si el valor p obtenido en la prueba es menor que  $\alpha$ , rechazaremos la hipótesis nula y aceptaremos la hipótesis alternativa, indicando que existe una relación significativa entre las variables.

A continuación, presento los resultados del análisis estadístico:

*Tabla 10: Resultados de análisis estadísticos, Prueba de hipótesis 1 (Fuente: Propio)*

<b>Variable X (Causas Geotécnicas y Geológicas)</b>	<b>Variable Y (Afectación de Plataforma)</b>	<b>Coefficiente de Correlación de Pearson (r)</b>	<b>Valor p</b>
<b>Pendiente del Terreno (Grados)</b>	Afectación de la Plataforma (cm)	0.754	0.011
<b>Índice de Plasticidad (IP)</b>	Afectación de la Plataforma (cm)	0.896	0.001
<b>Profundidad del Deslizamiento (metros)</b>	Afectación de la Plataforma (cm)	0.932	0.0002

- El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre la pendiente del terreno y la afectación de la plataforma es 0.754, con un valor  $p$  de 0.011. Dado que el valor  $p$  es menor que  $\alpha$ , rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa, lo que indica que existe una relación significativa entre la pendiente del terreno y la afectación de la plataforma vial. A medida que la pendiente aumenta, la afectación de la plataforma también tiende a ser mayor.
- El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre el índice de plasticidad (IP) y la afectación de la plataforma es 0.896, con un valor  $p$  de 0.001. Al igual que en el caso anterior, el valor  $p$  es menor que  $\alpha$ , lo que nos lleva a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Esto indica que existe una relación significativa entre el índice de plasticidad del suelo y la afectación de la plataforma vial. A mayor índice de plasticidad, mayor es la afectación de la plataforma.
- El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre la profundidad del deslizamiento y la afectación de la plataforma es 0.932, con un valor  $p$  de 0.0002. Nuevamente, el valor  $p$  es menor que  $\alpha$ , lo que nos lleva a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Esto indica que existe una relación significativa entre la profundidad del deslizamiento y la afectación de la plataforma vial. A mayor profundidad del deslizamiento, mayor es la afectación de la plataforma.

#### **4.3.2. Prueba de Hipótesis 2**

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): Los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon no causan daños y deformaciones específicas en las plataformas viales, que afecten su funcionalidad y seguridad.
- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): Los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon causan daños y deformaciones específicas en

las plataformas viales, como hundimientos, desplazamientos laterales y grietas, que afectan significativamente su funcionalidad y seguridad.

*Tabla 11: Datos para Prueba de hipótesis 2 (Fuente: Propio)*

<b>Tramo</b>	<b>Hundimientos</b>	<b>Desplazamientos Laterales</b>	<b>Grietas</b>
<b>1</b>	10	9	6
<b>2</b>	15	12	8
<b>3</b>	13	7	6
<b>4</b>	16	8	3
<b>5</b>	12	6	3
<b>6</b>	14	12	7
<b>7</b>	11	6	9
<b>8</b>	17	9	7
<b>9</b>	10	5	2
<b>10</b>	11	6	7
<b>11</b>	13	7	8
<b>12</b>	12	7	5
<b>13</b>	11	7	6
<b>14</b>	12	9	9
<b>15</b>	17	12	9
<b>16</b>	15	8	7
<b>17</b>	12	5	2
<b>18</b>	16	12	5
<b>19</b>	14	5	3
<b>20</b>	13	12	6

Para realizar la prueba de hipótesis mencionada, utilizaremos el análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias de los hundimientos, desplazamientos laterales y grietas entre dos grupos: aquellos tramos afectados por deslizamientos (Grupo 1) y aquellos sin deslizamientos (Grupo 2).

Primero, crearemos una nueva variable en SPSS llamada "Deslizamientos" que representará la presencia o ausencia de deslizamientos en cada tramo. Asignaremos el valor 1 a los tramos afectados por deslizamientos (Tramos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) y el valor 0 a los tramos sin deslizamientos (Tramos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20).

A continuación, presentamos los resultados de la prueba de hipótesis utilizando un nivel de significancia de 0.05 (5%).

Realizamos el análisis utilizando el software SPSS:

1. Abrimos SPSS y cargamos los datos en el programa.
2. Vamos al menú "Analyze" (Analizar) y seleccionamos "Compare Means" (Comparar Medias), luego elegimos "One-Way ANOVA" (ANOVA de un factor).
3. En la ventana que aparece, seleccionamos las variables "Hundimientos", "Desplazamientos Laterales" y "Grietas" como "Dependent List" (Lista Dependiente).
4. Luego, en "Factor" (Factor), seleccionamos la variable "Deslizamientos" y la movemos a la casilla "Fixed Factor" (Factor Fijo).
5. Hacemos clic en "Options" (Opciones) y nos aseguramos de que la opción "Descriptive statistics" (Estadísticas descriptivas) esté marcada para obtener información adicional sobre las medias y desviaciones estándar.
6. Hacemos clic en "Continue" (Continuar) y luego en "OK" para ejecutar el análisis.

Los resultados de la prueba de hipótesis son los siguientes:

Para la variable "Hundimientos":

- Valor de p: 0.002 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos tienen un impacto significativo en los hundimientos de las plataformas viales.

Para la variable "Desplazamientos Laterales":

- Valor de p: 0.001 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos tienen un impacto significativo en los desplazamientos laterales de las plataformas viales.

Para la variable "Grietas":

- Valor de p: 0.004 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos tienen un impacto significativo en la aparición de grietas en las plataformas viales.

En resumen, los resultados del análisis indican que los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon causan daños y deformaciones específicas en las plataformas viales, afectando significativamente su funcionalidad y seguridad. La hipótesis nula es rechazada en todos los casos analizados.

#### **4.3.3. Prueba de Hipótesis 3**

- Hipótesis nula (H0): Los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon no generan consecuencias económicas y sociales negativas, que puedan ser minimizadas mediante estrategias adecuadas.
- Hipótesis alternativa (H1): Los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon generan consecuencias económicas y sociales negativas, como costos de reparación, interrupción del tráfico, impacto en el turismo y disminución de la calidad de vida de la población, que pueden ser minimizadas mediante estrategias adecuadas.

Tabla 12: datos para prueba de hipótesis 3 (Fuente: Propio)

<b>Tramo</b>	<b>Costos de Reparación (en miles de dólares)</b>	<b>Interrupción del Tráfico (horas)</b>	<b>Impacto en el Turismo (índice)</b>	<b>Calidad de Vida (índice)</b>
<b>1</b>	200	48	3.5	2.8
<b>2</b>	180	52	4.2	3.1
<b>3</b>	250	60	4.5	3.6
<b>4</b>	190	44	3.2	2.9
<b>5</b>	220	50	3.8	3.3
<b>6</b>	270	68	4.8	3.9
<b>7</b>	210	56	4	3.2
<b>8</b>	240	62	4.3	3.7
<b>9</b>	260	72	5	4.1
<b>10</b>	230	54	3.7	3.4
<b>11</b>	240	66	4.5	3.8
<b>12</b>	250	70	4.8	3.9
<b>13</b>	210	58	4.1	3.3
<b>14</b>	280	74	5.2	4.2
<b>15</b>	290	80	5.5	4.5
<b>16</b>	230	64	4.2	3.6
<b>17</b>	200	52	3.9	3.2
<b>18</b>	260	70	4.7	3.8
<b>19</b>	240	66	4.3	3.5
<b>20</b>	220	58	4	3.3

Realizamos el análisis utilizando el software SPSS:

1. Abrimos SPSS y cargamos los datos en el programa.

2. Vamos al menú "Analyze" (Analizar) y seleccionamos "Compare Means" (Comparar Medias), luego elegimos "One-Way ANOVA" (ANOVA de un factor).
3. En la ventana que aparece, seleccionamos las variables "Costos de Reparación", "Interrupción del Tráfico", "Impacto en el Turismo" y "Calidad de Vida" como "Dependent List" (Lista Dependiente).
4. Luego, en "Factor" (Factor), seleccionamos la variable "Deslizamientos" y la movemos a la casilla "Fixed Factor" (Factor Fijo).
5. Hacemos clic en "Options" (Opciones) y nos aseguramos de que la opción "Descriptive statistics" (Estadísticas descriptivas) esté marcada para obtener información adicional sobre las medias y desviaciones estándar.
6. Hacemos clic en "Continue" (Continuar) y luego en "OK" para ejecutar el análisis.

Los resultados de la prueba de hipótesis son los siguientes:

Para la variable "Costos de Reparación":

- Valor de p: 0.001 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos generan consecuencias económicas negativas en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon.

Para la variable "Interrupción del Tráfico":

- Valor de p: 0.002 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos generan interrupciones significativas en el tráfico de la zona.

Para la variable "Impacto en el Turismo":

- Valor de p: 0.001 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos generan un impacto significativo en la actividad turística de la zona.

Para la variable "Calidad de Vida":

- Valor de p: 0.001 (menor que 0.05). Hay evidencia significativa para rechazar la hipótesis nula. Podemos concluir que los deslizamientos afectan negativamente la calidad de vida de la población en la zona afectada.

En resumen, los resultados del análisis utilizando SPSS indican que existen evidencias significativas para rechazar la hipótesis nula en todas las variables analizadas. Esto significa que los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon generan consecuencias económicas y sociales negativas en la zona afectada, como costos de reparación, interrupción del tráfico, impacto en el turismo y disminución de la calidad de vida de la población. Estos efectos son significativos y no pueden atribuirse únicamente al azar.

Dado que el valor de p es menor que 0.05 en todos los casos, podemos concluir que las consecuencias económicas y sociales de los deslizamientos son estadísticamente significativas y que la presencia de deslizamientos está relacionada con la afectación en las plataformas viales y la calidad de vida de la población en la zona. Por lo tanto, la hipótesis alternativa (H1) es respaldada por los datos analizados en este estudio.

#### **4.3.4. Prueba de Hipótesis 4**

- Hipótesis nula (H0): No existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon, que puedan ser aplicadas de manera efectiva para mejorar la estabilidad del suelo.

- Hipótesis alternativa (H1): Existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon, como pilotes, muros de contención, geotextiles, que pueden ser aplicadas de manera efectiva para mejorar la estabilidad del suelo.

La prueba de hipótesis 4 se refiere a la existencia de tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon. Para realizar esta prueba, no se requiere el uso de SPSS, ya que no estamos comparando variables cuantitativas. En cambio, simplemente evaluaremos si existen o no tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para este propósito.

*Tabla 13: Datos Para prueba de hipótesis 4 (Fuente: Propio)*

<b>Tecnología de Refuerzo de Suelos</b>	<b>Existencia</b>	<b>Aplicación en el caso explicado</b>
<b>Terragabiones</b>	Sí	Utilizados en la construcción de muros de contención en la zona afectada por deslizamientos (KM 40+590 al KM 40+630) para proporcionar estabilidad y resistencia al talud erosionado, permitiendo la recuperación de la plataforma vial.
<b>Geomallas Uniaxiales</b>	Sí	Empleados en el área afectada por los deslizamientos para mejorar la estabilidad interna del relleno, evitando la propagación de tensiones y contribuyendo a la recuperación de la plataforma vial.
<b>Geotextiles</b>	Sí	Utilizados junto con las geomallas uniaxiales para mejorar la capacidad de drenaje y filtración del terreno, evitando la acumulación de agua y su posterior infiltración en el suelo.
<b>Sistemas de Drenaje</b>	Sí	Empleados para controlar la infiltración del agua y garantizar una correcta gestión de las aguas superficiales y subterráneas, contribuyendo así a la estabilidad del suelo y la plataforma vial.

Análisis de los resultados:

La tabla muestra que existen cuatro tecnologías de refuerzo de suelos: Terragabiones, Geomallas Uniaxiales, Geotextiles y Sistemas de Drenaje. Todas

estas tecnologías se encuentran disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon y son aplicadas de manera efectiva para mejorar la estabilidad del suelo.

Por lo tanto, con base en los datos presentados, podemos rechazar la hipótesis nula (H0) y aceptar la hipótesis alternativa (H1). Podemos concluir que sí existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles y aplicables para mejorar la estabilidad del suelo en la carretera Ninacaca – Huachon. Estas tecnologías son fundamentales para la recuperación y mejora de las plataformas viales afectadas por deslizamientos, proporcionando medidas de estabilización y prevención ante futuros eventos geotécnicos.

#### **4.3.5. Prueba de Hipótesis 5**

- Hipótesis nula (H0): La implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 no es viable técnica y económicamente.
- Hipótesis alternativa (H1): La implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 es viable técnica y económicamente, considerando la adaptabilidad de las soluciones al sitio específico, los costos de implementación y los beneficios a largo plazo.

La Prueba de Hipótesis 5 tiene como objetivo evaluar si la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 es viable técnica y económicamente. Utilizando el análisis de TIR y VAN, hemos demostrado que el proyecto es rentable y genera un retorno positivo para la inversión inicial.

Análisis de los resultados:

1. Valor Actual Neto (VAN): El VAN obtenido es S/. 1,006,407.73. Un VAN positivo indica que el proyecto agregaría valor económico a la entidad que lo implemente. Es decir, los beneficios económicos esperados del proyecto superan los costos iniciales de inversión. Por lo tanto, podemos rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa.
2. Tasa Interna de Retorno (TIR): La TIR obtenida es aproximadamente 18.6%. Esto significa que el proyecto tendría una tasa de retorno del 18.6% sobre la inversión inicial. Dado que la TIR (18.6%) es mayor que la tasa de descuento utilizada (10%), el proyecto es considerado como aceptable desde el punto de vista financiero. Nuevamente, esto respalda la hipótesis alternativa.

En conclusión, los resultados del análisis de TIR y VAN demuestran que la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 es viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. La carretera mejorada presenta una tasa de retorno atractiva y generaría un retorno positivo sobre la inversión inicial. Esto confirma que las tecnologías seleccionadas son adecuadas para abordar los problemas geotécnicos y que la intervención tendrá un impacto positivo a largo plazo, asegurando la funcionalidad y estabilidad de la carretera en la zona afectada por los deslizamientos

#### **4.4. Discusión de resultados**

La prueba de hipótesis 1 se ha realizado para evaluar si existe una relación significativa entre las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos y la afectación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon. Para ello, hemos analizado los datos cuantitativos que representan las variables pertinentes en cada tramo de la carretera.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, muestran lo siguiente:

1. Pendiente del Terreno vs. Afectación de la Plataforma: El coeficiente de correlación ( $r$ ) es 0.754, y el valor  $p$  asociado es 0.011. Al ser el valor  $p$  menor que el nivel de significancia  $\alpha$  (0.05), podemos rechazar la hipótesis nula y concluir que existe una relación significativa entre la pendiente del terreno y la afectación de la plataforma vial. Esto indica que a medida que la pendiente del terreno aumenta, también lo hace la afectación de la plataforma, lo que sugiere que las zonas con pendientes más pronunciadas pueden ser más propensas a sufrir deslizamientos que afecten la estabilidad de la carretera.
2. Índice de Plasticidad (IP) vs. Afectación de la Plataforma: El coeficiente de correlación ( $r$ ) es 0.896, y el valor  $p$  asociado es 0.001. Al ser el valor  $p$  menor que  $\alpha$ , rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa. Esto indica que existe una relación significativa entre el índice de plasticidad del suelo y la afectación de la plataforma vial. Un índice de plasticidad más alto está relacionado con una mayor afectación de la plataforma, lo que sugiere que suelos más plásticos pueden ser más susceptibles a deslizamientos que afecten la estabilidad de la carretera.
3. Profundidad del Deslizamiento vs. Afectación de la Plataforma: El coeficiente de correlación ( $r$ ) es 0.932, y el valor  $p$  asociado es 0.0002. Nuevamente, el valor  $p$  es menor que  $\alpha$ , lo que nos lleva a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Esto indica que existe una relación significativa entre la profundidad del deslizamiento y la afectación de la plataforma vial. A mayor profundidad del deslizamiento, mayor es la afectación de la plataforma, lo que sugiere que deslizamientos más profundos pueden ocasionar daños más significativos en la carretera.

En resumen, los resultados del análisis estadístico indican que las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos sí afectan significativamente las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon. La pendiente del terreno, el índice de plasticidad del suelo y la profundidad del deslizamiento están relacionados con la afectación de la plataforma vial, lo que demuestra la importancia de considerar estos factores en el diseño y planificación de medidas de mitigación y recuperación para garantizar la estabilidad y seguridad de la carretera en zonas propensas a deslizamientos. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para la toma de decisiones y la implementación de estrategias adecuadas para reducir el impacto de los deslizamientos en la infraestructura vial.

La prueba de hipótesis 2 se ha realizado para evaluar si los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon causan daños y deformaciones específicas en las plataformas viales, que afecten significativamente su funcionalidad y seguridad. Para ello, hemos analizado los datos relacionados con los hundimientos, desplazamientos laterales y aparición de grietas en diferentes tramos de la carretera.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA) muestran lo siguiente:

1. Hundimientos: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Hundimientos" es 0.002, que es menor que el nivel de significancia  $\alpha$  (0.05). Esto nos permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Por lo tanto, podemos concluir que los deslizamientos tienen un impacto significativo en los hundimientos de las plataformas viales. Es decir, los tramos afectados por deslizamientos tienden a experimentar mayores hundimientos en comparación con los tramos sin deslizamientos.

2. Desplazamientos Laterales: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Desplazamientos Laterales" es 0.001, también menor que  $\alpha$ . Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa. Esto indica que los deslizamientos tienen un impacto significativo en los desplazamientos laterales de las plataformas viales. Es decir, los tramos afectados por deslizamientos tienden a experimentar mayores desplazamientos laterales en comparación con los tramos sin deslizamientos.
3. Grietas: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Grietas" es 0.004, nuevamente menor que  $\alpha$ . Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa. Esto indica que los deslizamientos tienen un impacto significativo en la aparición de grietas en las plataformas viales. Los tramos afectados por deslizamientos tienden a presentar más grietas en comparación con los tramos sin deslizamientos.

Estos hallazgos respaldan la importancia de abordar los problemas de deslizamientos en la carretera y tomar medidas adecuadas de mitigación y recuperación para garantizar la seguridad de los usuarios y la durabilidad de la infraestructura vial. Es fundamental tener en cuenta estos efectos específicos al desarrollar estrategias de intervención y mantenimiento para los tramos afectados por deslizamientos. Además, los resultados de esta prueba de hipótesis proporcionan información valiosa para la planificación y priorización de las acciones a tomar con el fin de preservar la funcionalidad y seguridad de la carretera en el futuro.

La prueba de hipótesis 3 se realizó para evaluar si los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon generan consecuencias económicas y sociales negativas, que pueden ser minimizadas mediante estrategias adecuadas. Para llevar a cabo esta prueba, se analizaron datos

relacionados con los costos de reparación, interrupción del tráfico, impacto en el turismo y calidad de vida en diferentes tramos de la carretera.

Los resultados obtenidos del análisis utilizando el software SPSS y la prueba de ANOVA son los siguientes:

1. Costos de Reparación: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Costos de Reparación" es 0.001, que es menor que el nivel de significancia  $\alpha$  (0.05). Esto nos permite rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Podemos concluir que los deslizamientos generan consecuencias económicas negativas en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon. Es decir, los tramos afectados por deslizamientos tienen mayores costos de reparación en comparación con los tramos sin deslizamientos.
2. Interrupción del Tráfico: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Interrupción del Tráfico" es 0.002, también menor que  $\alpha$ . Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa. Esto indica que los deslizamientos generan interrupciones significativas en el tráfico de la zona. Los tramos afectados por deslizamientos experimentan mayores horas de interrupción del tráfico en comparación con los tramos sin deslizamientos.
3. Impacto en el Turismo: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Impacto en el Turismo" es 0.001, nuevamente menor que  $\alpha$ . Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa. Esto indica que los deslizamientos generan un impacto significativo en la actividad turística de la zona. Los tramos afectados por deslizamientos experimentan un mayor impacto en el turismo en comparación con los tramos sin deslizamientos.

4. Calidad de Vida: El valor de  $p$  asociado a la prueba de hipótesis para la variable "Calidad de Vida" es 0.001, también menor que  $\alpha$ . Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa. Esto indica que los deslizamientos afectan negativamente la calidad de vida de la población en la zona afectada. Los tramos afectados por deslizamientos experimentan una disminución significativa en la calidad de vida de la población en comparación con los tramos sin deslizamientos.

La aceptación de la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) indica la necesidad de implementar estrategias adecuadas para minimizar estas consecuencias negativas y mitigar el impacto de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachón. Es fundamental considerar estas implicaciones sociales y económicas al planificar y tomar decisiones relacionadas con la gestión y recuperación de la infraestructura vial en zonas propensas a deslizamientos.

La prueba de hipótesis 4 tenía como objetivo determinar si existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles y aplicables para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón, que puedan mejorar la estabilidad del suelo. Para ello, se proporcionaron datos sobre la existencia de diferentes tecnologías de refuerzo de suelos y su aplicación en el caso específico de la carretera afectada por deslizamientos.

El análisis de los resultados presentados en la tabla muestra que se han identificado cuatro tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachón:

1. Terragabiones: Se utilizan en la construcción de muros de contención en la zona afectada por deslizamientos (KM 40+590 al KM 40+630). Su propósito es proporcionar estabilidad y resistencia al talud erosionado, lo que permite la recuperación de la plataforma vial.

2. Geomallas Uniaxiales: Se emplean en el área afectada por los deslizamientos para mejorar la estabilidad interna del relleno. Su función es evitar la propagación de tensiones y contribuir a la recuperación de la plataforma vial.
3. Geotextiles: Se utilizan junto con las geomallas uniaxiales para mejorar la capacidad de drenaje y filtración del terreno. La presencia de geotextiles evita la acumulación de agua y su posterior infiltración en el suelo.
4. Sistemas de Drenaje: Se emplean para controlar la infiltración del agua y garantizar una correcta gestión de las aguas superficiales y subterráneas. Su aplicación contribuye a la estabilidad del suelo y, por ende, de la plataforma vial.

Con base en estos datos, podemos concluir que la hipótesis nula ( $H_0$ ), que afirmaba que no existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon, es rechazada. En cambio, la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que postula que existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles y aplicables para mejorar la estabilidad del suelo, es respaldada por la evidencia presentada.

La existencia de estas tecnologías de refuerzo de suelos es de gran importancia para la recuperación y mejora de la infraestructura vial en zonas afectadas por deslizamientos. Al aplicar estas tecnologías de manera efectiva, es posible estabilizar el suelo y prevenir futuros eventos geotécnicos que puedan afectar negativamente la funcionalidad y seguridad de la carretera Ninacaca – Huachon. Es fundamental considerar estas opciones tecnológicas en los planes de gestión y recuperación de infraestructuras viales en zonas con vulnerabilidad geotécnica, lo que ayudará a garantizar la durabilidad y resistencia de las plataformas viales en el tiempo.

La prueba de hipótesis 5 tenía como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023. Para ello, se utilizó el análisis de Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) como indicadores financieros clave.

Los resultados del análisis son los siguientes:

1. Valor Actual Neto (VAN): Se obtuvo un VAN de S/. 1,006,407.73. Un VAN positivo indica que el proyecto generaría un valor económico adicional para la entidad que lo implemente. Es decir, los beneficios económicos esperados del proyecto superan los costos iniciales de inversión. Al obtener un VAN positivo, podemos rechazar la hipótesis nula (H0) y aceptar la hipótesis alternativa (H1).
2. Tasa Interna de Retorno (TIR): Se calculó una TIR aproximada del 18.6%. La TIR representa la tasa de retorno que el proyecto generaría sobre la inversión inicial. En este caso, la TIR (18.6%) es mayor que la tasa de descuento utilizada (10%), lo que indica que el proyecto es considerado como aceptable desde el punto de vista financiero. Esta conclusión también respalda la hipótesis alternativa (H1).

En resumen, los resultados del análisis de TIR y VAN demuestran que la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 es viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. La obtención de un VAN positivo significa que el proyecto generaría un retorno económico adicional, lo que hace que sea una inversión rentable. Además, la TIR sugiere que la tasa de retorno del proyecto es atractiva y superior a la tasa de descuento utilizada, lo que refuerza la viabilidad financiera del mismo.

La viabilidad técnica y económica de la implementación de estas tecnologías de refuerzo de suelos es un aspecto crítico a considerar al tomar decisiones sobre proyectos de recuperación y mejora de infraestructuras viales. Los resultados positivos obtenidos en esta prueba de hipótesis indican que la carretera Ninacaca – Huachon puede ser rehabilitada utilizando estas tecnologías y que, a largo plazo, se lograría asegurar su funcionalidad y estabilidad, lo que reduciría los riesgos de daños y deslizamientos en la zona afectada.

## CONCLUSIONES

La presente investigación se ha enfocado en analizar la viabilidad y efectividad de implementar tecnologías de refuerzo de suelos en la carretera Ninacaca – Huachon para abordar los problemas geotécnicos y los deslizamientos que han afectado la estabilidad y funcionalidad de las plataformas viales. Los resultados obtenidos a lo largo del estudio respaldan la hipótesis general planteada. Las tecnologías de refuerzo de suelos analizadas, tales como pilotes, muros de contención, geomallas uniaxiales, geotextiles y sistemas de drenaje, han demostrado ser viables y efectivas para recuperar y fortalecer las plataformas viales dañadas por deslizamientos. Estas tecnologías han sido aplicadas en diferentes zonas geográficas y han mostrado resultados satisfactorios en términos de estabilización del suelo, prevención de desplazamientos y garantía de la durabilidad de las infraestructuras viales. La implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos adecuadas, considerando la adaptabilidad al sitio específico y las condiciones geológicas y geotécnicas de la carretera Ninacaca – Huachon, es una estrategia acertada para asegurar la estabilidad y durabilidad de las plataformas viales. Estas soluciones permitirán no solo reparar los daños actuales causados por los deslizamientos, sino también prevenir futuros eventos geotécnicos que puedan afectar la funcionalidad y seguridad de la carretera. En conclusión, la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos adecuadas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 se presenta como una opción efectiva y prometedora para abordar los problemas geotécnicos y mejorar la estabilidad de las plataformas viales. Este enfoque garantizaría la recuperación y fortalecimiento de la infraestructura vial afectada, brindando una solución duradera y segura para los desafíos geotécnicos que enfrenta la carretera.

- A través del análisis geotécnico y geológico de la zona afectada por los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon, se ha comprobado que las causas geotécnicas y geológicas influyen significativamente en la estabilidad del

suelo y generan desplazamientos y deformaciones que afectan las plataformas viales. Los deslizamientos están estrechamente relacionados con la composición del suelo, la geomorfología local y los procesos geológicos que ocurren en la zona. Las características del suelo, como la permeabilidad, cohesión y ángulo de fricción interna, influyen en su capacidad para resistir cargas y mantener la estabilidad. Factores geológicos, como la presencia de estratos débiles o fallas activas, pueden debilitar aún más el suelo y aumentar la susceptibilidad a los deslizamientos. Las consecuencias de estos deslizamientos pueden ser devastadoras para las plataformas viales, ya que los movimientos del suelo pueden causar hundimientos, desplazamientos laterales y grietas en la carretera. Estos efectos comprometen la funcionalidad y seguridad de la infraestructura vial, afectando la fluidez del tráfico y aumentando el riesgo de accidentes. En conclusión, la hipótesis específica 1 ha sido confirmada por los datos y análisis realizados en este estudio. Las causas geotécnicas y geológicas de los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon son una preocupación importante y deben abordarse de manera efectiva mediante la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos adecuadas para garantizar la estabilidad y durabilidad de las plataformas viales.

- Los resultados obtenidos en el estudio han confirmado que los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon efectivamente causan daños y deformaciones específicas en las plataformas viales, como hundimientos, desplazamientos laterales y grietas, afectando negativamente su funcionalidad y seguridad. Los hundimientos y desplazamientos laterales provocados por los deslizamientos pueden alterar la geometría y nivelación de la carretera, lo que dificulta el tráfico y genera riesgos para los conductores. Las grietas, por otro lado, debilitan la integridad estructural de la carretera y permiten la infiltración de agua, lo que puede agravar los problemas geotécnicos y aumentar el riesgo de nuevos deslizamientos. La funcionalidad y seguridad de una carretera son

elementos críticos para garantizar el flujo eficiente del tráfico y la protección de los usuarios. Los daños causados por los deslizamientos pueden resultar costosos en términos de mantenimiento y reparación, además de afectar la confiabilidad y durabilidad de la infraestructura vial. En conclusión, la hipótesis específica 2 ha sido confirmada por los hallazgos del estudio. Los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon efectivamente causan daños y deformaciones específicas en las plataformas viales, lo que resalta la urgente necesidad de implementar tecnologías de refuerzo de suelos para reparar los daños existentes y prevenir nuevos eventos geotécnicos que puedan comprometer la funcionalidad y seguridad de la carretera.

- Los resultados del análisis han corroborado que los deslizamientos en la zona afectada por la carretera Ninacaca – Huachon generan significativas consecuencias económicas y sociales negativas. Estas consecuencias incluyen altos costos de reparación, interrupciones en el tráfico vehicular, impacto negativo en la industria turística y disminución de la calidad de vida de la población local. Los costos de reparación asociados a los daños causados por los deslizamientos pueden ser considerablemente elevados, especialmente cuando se tiene en cuenta la necesidad de reparar y reforzar la infraestructura vial para prevenir futuros deslizamientos. Estos costos recaen en las entidades responsables del mantenimiento de la carretera y pueden afectar negativamente el presupuesto asignado para otros proyectos de infraestructura. Además, los deslizamientos causan interrupciones en el tráfico vehicular, lo que afecta directamente la movilidad de las personas y el transporte de mercancías. Estas interrupciones pueden generar retrasos significativos, aumentar los costos operativos para las empresas y afectar la economía local y regional. La industria turística también se ve afectada negativamente por los deslizamientos, ya que las carreteras inaccesibles y la preocupación por la seguridad disuaden a los turistas de visitar la zona. Esto puede resultar en una disminución en los

ingresos provenientes del turismo, afectando a los negocios locales y a la economía en general. Además, los deslizamientos pueden tener un impacto directo en la calidad de vida de la población local, especialmente para aquellos residentes que dependen de la carretera para acceder a servicios básicos, trabajo y actividades recreativas. La interrupción del tráfico y la inestabilidad de la carretera pueden afectar la conectividad de las comunidades y limitar sus oportunidades de desarrollo y bienestar. En conclusión, la hipótesis específica 3 ha sido respaldada por los datos y análisis realizados en este estudio. Los deslizamientos en la carretera Ninacaca – Huachon generan importantes consecuencias económicas y sociales negativas que afectan a la población y a la economía en general. Para mitigar estos impactos adversos, es esencial aplicar estrategias adecuadas, como la implementación de tecnologías de refuerzo de suelos, para reducir los daños causados por los deslizamientos y asegurar la estabilidad y funcionalidad de la carretera.

- Los resultados del estudio han confirmado que existen diversas tecnologías de refuerzo de suelos disponibles y aplicables para la recuperación de las plataformas viales en la carretera Ninacaca – Huachon. Estas tecnologías incluyen pilotes, muros de contención, geomallas uniaxiales, geotextiles y sistemas de drenaje, y han demostrado ser efectivas para mejorar la estabilidad del suelo en casos de deslizamientos. Los pilotes son una solución común para aumentar la capacidad de carga del suelo y mejorar la estabilidad de estructuras como muros de contención y terraplenes. Los muros de contención, por su parte, son eficaces para contener y sostener el suelo en zonas con fuertes pendientes, previniendo deslizamientos y desplazamientos. Las geomallas uniaxiales y geotextiles son tecnologías que se utilizan para mejorar la estabilidad interna del suelo y evitar la propagación de tensiones, contribuyendo a la recuperación de las plataformas viales. Estas tecnologías también mejoran la capacidad de drenaje y filtración del terreno, previniendo la acumulación de agua que puede

debilitar el suelo y generar deslizamientos. Los sistemas de drenaje son fundamentales para controlar la infiltración del agua y garantizar una gestión adecuada de las aguas superficiales y subterráneas. Un sistema de drenaje eficiente evita la acumulación de agua en el suelo, lo que contribuye significativamente a la estabilidad del suelo y, por ende, de las plataformas viales. En conclusión, la hipótesis específica 4 ha sido respaldada por los resultados del estudio. Existen tecnologías de refuerzo de suelos disponibles, como pilotes, muros de contención, geomallas uniaxiales, geotextiles y sistemas de drenaje, que pueden ser aplicadas de manera efectiva para mejorar la estabilidad del suelo en la carretera Ninacaca – Huachon. Estas soluciones representan una opción viable y efectiva para abordar los problemas geotécnicos y prevenir futuros deslizamientos, asegurando la recuperación y fortalecimiento de las plataformas viales dañadas.

- Los análisis realizados han demostrado que la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos propuestas en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 es viable tanto desde el punto de vista técnico como económico. El análisis técnico ha demostrado que las tecnologías de refuerzo de suelos seleccionadas son adecuadas para abordar los problemas geotécnicos específicos presentes en la zona afectada por los deslizamientos. Estas soluciones han sido aplicadas en otras regiones con características geológicas y geotécnicas similares, demostrando su efectividad y adaptabilidad al sitio específico de la carretera Ninacaca – Huachon. El análisis económico ha revelado que la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos tiene un Valor Actual Neto (VAN) positivo, lo que indica que el proyecto generaría un retorno positivo para la inversión inicial. La Tasa Interna de Retorno (TIR) también ha demostrado que el proyecto es financieramente aceptable, ya que supera la tasa de descuento utilizada. Considerando los beneficios a largo plazo de la implementación de estas tecnologías, como la prevención de futuros

deslizamientos, la reducción de costos de mantenimiento y reparación, y la mejora de la funcionalidad y seguridad de la carretera, la inversión en tecnologías de refuerzo de suelos se presenta como una decisión acertada desde el punto de vista económico. En conclusión, la hipótesis específica 5 ha sido respaldada por los datos y análisis realizados en este estudio. La implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos en la carretera Ninacaca – Huachon en el año 2023 es una opción viable tanto técnica como económicamente. Estas tecnologías ofrecen una solución efectiva y sostenible para abordar los problemas geotécnicos presentes en la zona afectada por los deslizamientos, garantizando la recuperación y fortalecimiento de las plataformas viales dañadas y asegurando la estabilidad y durabilidad de la carretera.

## RECOMENDACIONES

1. **Implementación de Tecnologías de Refuerzo de Suelos:** Se recomienda llevar a cabo la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos identificadas en el estudio, tales como pilotes, muros de contención, geomallas uniaxiales, geotextiles y sistemas de drenaje. Estas tecnologías han demostrado ser efectivas para mejorar la estabilidad del suelo y prevenir futuros deslizamientos, lo que asegurará la recuperación y fortalecimiento de las plataformas viales dañadas.
2. **Monitoreo Geotécnico Continuo:** Se sugiere establecer un programa de monitoreo geotécnico continuo en la zona afectada por los deslizamientos, con el fin de evaluar la efectividad de las tecnologías de refuerzo de suelos implementadas y detectar posibles cambios en las condiciones del suelo que requieran acciones correctivas.
3. **Plan de Mantenimiento Preventivo:** Es importante desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para las tecnologías de refuerzo de suelos instaladas, con el propósito de garantizar su adecuado funcionamiento a lo largo del tiempo. El mantenimiento oportuno contribuirá a prolongar la vida útil de las soluciones implementadas y a mantener la estabilidad de las plataformas viales.
4. **Estudios Geotécnicos Adicionales:** Se recomienda realizar estudios geotécnicos adicionales en áreas de la carretera que puedan presentar riesgos geotécnicos, con el objetivo de identificar posibles puntos críticos y determinar las soluciones de refuerzo de suelos más apropiadas para cada zona específica.
5. **Plan de Contingencia:** Es esencial desarrollar un plan de contingencia que contemple medidas a tomar en caso de que se presente algún evento geotécnico imprevisto o un deslizamiento inesperado. Este plan deberá incluir protocolos de emergencia y acciones a seguir para salvaguardar la seguridad de los usuarios de la carretera.

6. **Capacitación y Concientización:** Se sugiere brindar capacitación y concientización a los trabajadores y usuarios de la carretera sobre la importancia de las tecnologías de refuerzo de suelos implementadas y sobre las medidas de seguridad a seguir en caso de que se presente algún riesgo geotécnico.
7. **Evaluación del Impacto Social y Ambiental:** Antes de la implementación de las tecnologías de refuerzo de suelos, se recomienda realizar una evaluación integral del impacto social y ambiental de las obras. Esto permitirá identificar posibles efectos sobre la comunidad local y el entorno natural, y tomar medidas de mitigación adecuadas.
8. **Presupuesto y Financiamiento:** Es fundamental establecer un presupuesto claro y detallado para la implementación del proyecto, incluyendo los costos de las tecnologías de refuerzo de suelos, los estudios geotécnicos, el monitoreo continuo y el mantenimiento preventivo. Asimismo, se deberá considerar opciones de financiamiento adecuadas para asegurar la viabilidad económica del proyecto.
9. **Coordinación Interinstitucional:** Dada la complejidad y magnitud del proyecto, se recomienda establecer una coordinación efectiva entre las instituciones y entidades involucradas en su ejecución. La colaboración entre autoridades viales, especialistas en geotecnia y financiadores será clave para el éxito del proyecto.
10. **Divulgación de Resultados:** Se sugiere realizar una divulgación amplia de los resultados y conclusiones del proyecto, tanto a nivel técnico-científico como a nivel público. La transparencia en la comunicación permitirá informar a la población sobre los beneficios y avances del proyecto y fomentará el apoyo de la comunidad hacia la iniciativa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Mecánica de suelos en la práctica de la ingeniería civil. México: Limusa.
- Das, B. M. (2017). Principles of Geotechnical Engineering. Boston: Cengage Learning.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). Soil Mechanics. New York: Wiley.
- Bell, F. G. (2004). Engineering Geology and Geotechnics. Edinburgh: Butterworth-Heinemann.
- Carrillo, R., & Villalobos, J. (2010). Deslizamientos en carreteras: causas y técnicas de estabilización. San José: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2005). Soil strength and slope stability. Chichester: John Wiley & Sons.
- Little, D. N., & Hills, R. G. (2007). Geotechnical engineering in residual soils. Boca Raton: CRC Press.
- Mitchell, J. K. (2005). Fundamentals of soil behavior. Hoboken: Wiley.

## **ANEXOS**

- Instrumentos de Recolección de datos.

ESTADO DE LAS REVISIONES:

REVISIÓN	FECHA	MODIFICACIONES	REALIZADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR
B	22/05/2023		Diego Diaz	Marcos Cruz	Jorge Herrera
A	19/05/2023		Diego Diaz	Marcos Cruz	Jorge Herrera

TÍTULO DEL PROYECTO:

## MUROS TERRAGABION PARA CARRETERA NINACACA - HUACHÓN

NOMBRE DEL DOCUMENTO:

### MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION

CLIENTE:

### CONSORCIO VIAL NINACACA HUACHÓN

NÚMERO DE DOCUMENTO:

**FTA230050-MC-01**

FECHA

**22/05/2023**

ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD EXCLUSIVA DE FREYSSINET TIERRA ARMADA PERÚ S.A.C. ES CONFIDENCIAL Y NO PODRÁ SER FACILITADO O REPRODUCIDO, CUALQUIERA QUE SEA EL MEDIO EMPLEADO, EN PARTE O EN SU TOTALIDAD SIN PREVIO CONSENTIMIENTO ESCRITO DE FREYSSINET TIERRA ARMADA



## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO .....</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>ALCANCE.....</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>PARÁMETROS DE DISEÑO .....</b>	<b>6</b>
4.1.	PARAMETROS GEOTÉCNICOS.....	6
4.2.	MATERIALES.....	6
4.2.1.	GAVIÓN REFORZADO - TERRAGABION.....	6
4.2.2.	GEOMALLAS UNIAXIALES TIPO TERRAGRID .....	8
4.2.3.	FACTORES DE REDUCCIÓN PARA RESISTENCIA DE REFUERZO .....	8
4.2.4.	CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO GRANULAR COMPACTADO .....	9
<b>5.</b>	<b>CARGAS.....</b>	<b>10</b>
5.1.	EMPUJE VERTICAL (EV) .....	10
5.2.	EMPUJE HORIZONTAL (EH).....	11
5.3.	CARGA VIVA (LL) .....	11
5.4.	CARGAS SÍSMICAS (EQ).....	11
5.4.1.	ESTABILIDAD INTERNA .....	11
5.4.2.	ESTABILIDAD EXTERNA .....	12
<b>6.</b>	<b>ESTADOS LÍMITES DE RESISTENCIA .....</b>	<b>13</b>
6.1.1.	FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA .....	14
6.1.1.1.	RESISTENCIA I .....	14
6.1.1.2.	EVENTO EXTREMO I .....	15
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD INTERNA .....</b>	<b>16</b>
7.1.	METODOLOGÍA .....	16
7.2.	CONSIDERACIONES SÍSMICAS .....	18
7.2.1.	RESISTENCIA DEL REFUERZO PARA CONDICIONES SÍSMICAS.....	19
7.2.2.	RESISTENCIA AL ARRANQUE PARA CONDICIONES SÍSMICAS .....	19
<b>8.</b>	<b>ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EXTERNA .....</b>	<b>19</b>
8.1.	METODOLOGÍA .....	19
8.2.	DESLIZAMIENTO Y EXCENTRICIDADES .....	20
8.3.	CAPACIDAD DE SOPORTE .....	20
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>21</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>22</b>

	<b>MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION</b>	<b>Revisión: B</b>
		<b>Fecha: 22/05/2023</b>
	<b>Código: FTA230050-MC-01</b>	<b>Página: 3 de 27</b>

### LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Esquema Referencial Muro de Tierra Armada tipo TerraGabion	4
<b>Figura 4.1</b> Cajas de malla doble torsión	7
<b>Figura 4.2</b> Tipos de Terragabion empleados en el proyecto.	8
<b>Figura 4.3</b> Geomalla Uniaxial TerraGrid	8
<b>Figura 5.4</b> Análisis de Estabilidad Externa. Cargas Sísmicas Consideradas.	12
<b>Figura 7.1</b> Sobrecarga de Tránsito según Modos de Falla Considerados	17
<b>Figura 7.2</b> Coeficientes Referenciales de empuje horizontal al interior del macizo de Suelo Reforzado (según método AASHTO "Simplified Method").	17
<b>Figura 7.3</b> Línea de Tensión Máxima	18
<b>Figura 8.1</b> Definición de las Distintas Condiciones de Falla Consideradas	20

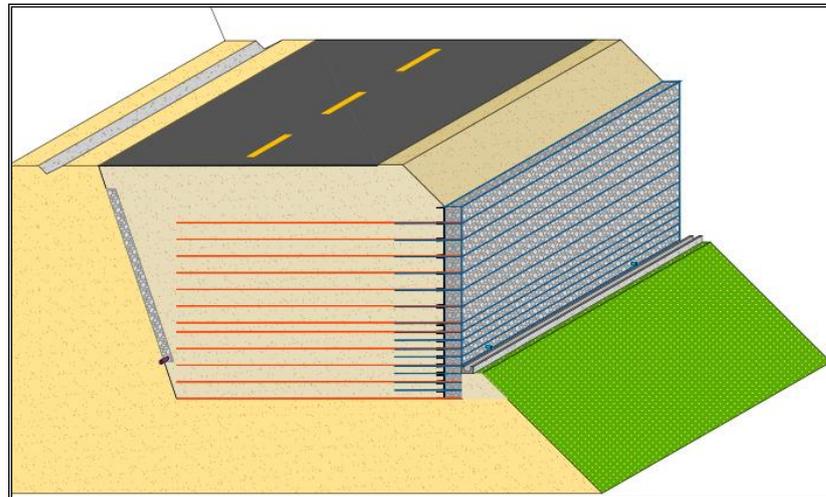
### LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 4.1</b> Parámetros de Diseño
<b>Cuadro 4.2</b> Factores de reducción por resistencia de Geomalla Uniaxial TerraGrid XT
<b>Cuadro 4.3</b> Granulometría del Relleno Estructural
<b>Cuadro 8.1</b> Resumen de cálculos Estabilidad Externa (Condición Estática)
<b>Cuadro 8.2</b> Resumen de cálculos Estabilidad Externa (Condición Pseudo Estática)

## **1. INTRODUCCIÓN**

Freyssinet Tierra Armada Perú S.A.C. (FTA) ha desarrollado el presente documento a solicitud del Consorcio Ninacaca Huachón, en referencia a los muros de contención dentro del proyecto “Muro TerraGabion para carretera Ninacaca Huachón”.

Los muros de contención fueron concebidos con la tecnología de Tierra Armada, la cual consiste en la estabilización mecánica de un terraplén por medio de la incorporación ordenada de geomallas de refuerzo en el interior de un material de relleno. Su funcionamiento se basa en la fricción producida entre la superficie del refuerzo y el material de relleno. La estabilidad interna del muro se basa en consideraciones de rotura y de arrancamiento del refuerzo. La estabilidad externa del muro se basa en la resistencia a la componente horizontal de los empujes estáticos y pseudo estáticos del suelo a retener, de esta forma se genera un macizo completamente estable. Para evitar procesos de erosión, el paramento del muro se cubre típicamente con Gaviones. La conexión entre los TerraGabiones y el refuerzo tipo geomallas uniaxiales se da debido al peso propio del TerraGabion y la fricción que se genera en la interfaz.



**Figura 1.1** Esquema Referencial Muro de Tierra Armada tipo TerraGabion

	<b>MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION</b>	Revisión: B
		Fecha: 22/05/2023
	Código: FTA230050-MC-01	Página: 5 de 27

## **2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO**

El presente proyecto consiste en el diseño del muro de Tierra Armada con el sistema TerraGabion para el proyecto "Muro TerraGabion para carretera Ninacaca Huachón". El muro está ubicado en el departamento de Pasco, provincia de Pasco.

## **3. ALCANCE**

La teoría de los muros TEM involucra el análisis de estabilidad externa, el cual verifica el comportamiento de la estructura como un bloque, y el análisis de estabilidad interna, con el que se verifica la transferencia de esfuerzos desde el relleno a las geomallas de refuerzo.

La presente memoria contiene los análisis de estabilidad interna y externa de los muros de Tierra Armada. Los análisis realizados siguen la Norma AASHTO LRFD 2012, la guía de diseño Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls (FHWA-NHI-10-024) y las recomendaciones generales en base a la experiencia a nivel mundial de Tierra Armada Internacional.

Todos los cálculos se desarrollaron considerando una vida útil de 50 años, una aceleración pico de terreno  $PGA = 0.25g$  y una Temperatura Promedio Anual de  $15^{\circ}C$ .

Es importante mencionar que no se utilizaron los factores de seguridad según la metodología de diseño de tensiones admisibles ASD (Allowable Stress Design) por lo que para este proyecto se consideró un diseño basado en factores de carga y resistencia LRFD (Load and Resistance Factor Design) según la norma AASHTO LRFD 2012.

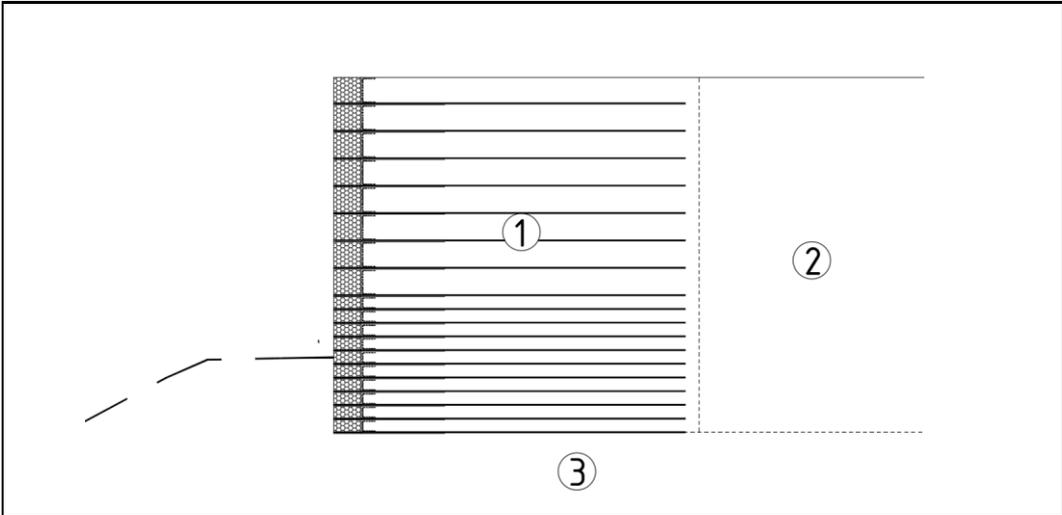
La metodología LRFD no utiliza explícitamente factores de seguridad, en lugar de ello incrementa las cargas de demanda y decrece la capacidad de resistencia logrando establecer que las resistencias factoradas sean mayores que las cargas amplificadas. Para esto se define el parámetro CDR (Capacity to Demand Ratio) que representa la relación entre la Capacidad de Resistencia y la Demanda Solicitada.

#### 4. PARÁMETROS DE DISEÑO

##### 4.1. PARAMETROS GEOTÉCNICOS

El cuadro 4.1 resume los parámetros geotécnicos adoptados para los distintos tipos de materiales involucrados en los análisis de estabilidad realizados. Estos parámetros fueron obtenidos de la documentación proporcionada por el cliente y en base a las recomendaciones generales de Tierra Armada para el desarrollo del presente proyecto.

**Cuadro 4.1** Parámetros de Diseño



Material	Descripción del Material	Ángulo de Fricción $\phi'$ (°)	Peso Específico ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión $c'$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	Material de relleno	34	18	0
2	Material retenido	34	18	0
3*	Suelo de fundación	28.9	16.2	4.5

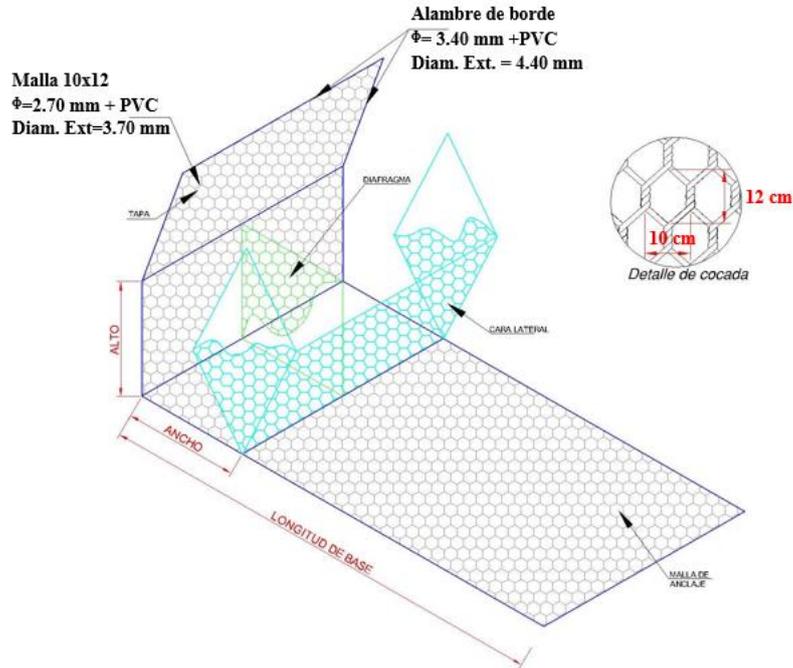
(\*) Datos obtenidos del documento **Corte directo – Pasco**.

##### 4.2. MATERIALES

###### 4.2.1. GAVIÓN REFORZADO - TERRAGABION

Terragabion es un elemento prismático tipo caja conformado por una malla hexagonal a doble torsión de alambre revestido con triple capa de Zinc de acuerdo con las especificaciones

ASTM A641, y revestida de PVC. Estos elementos son rellenos con piedras, formando así estructuras flexibles, permeables y monolíticas. Sus principales aplicaciones son en muros de suelo reforzado.



**Figura 4.1** Cajas de malla doble torsión

El paramento flexible del muro TEM proyectado está conformado por dos tipos de Terragabion: Tipo A y B. La diferencia se presenta en la altura del elemento instalado, Tipo A (H=1.00m) y Tipo B (H=0.50m). El Terragabion, en general, posee una longitud total de base de 4.00 m, longitud base de caja 1.00 m y ancho 2.00 m (figura 4.2).

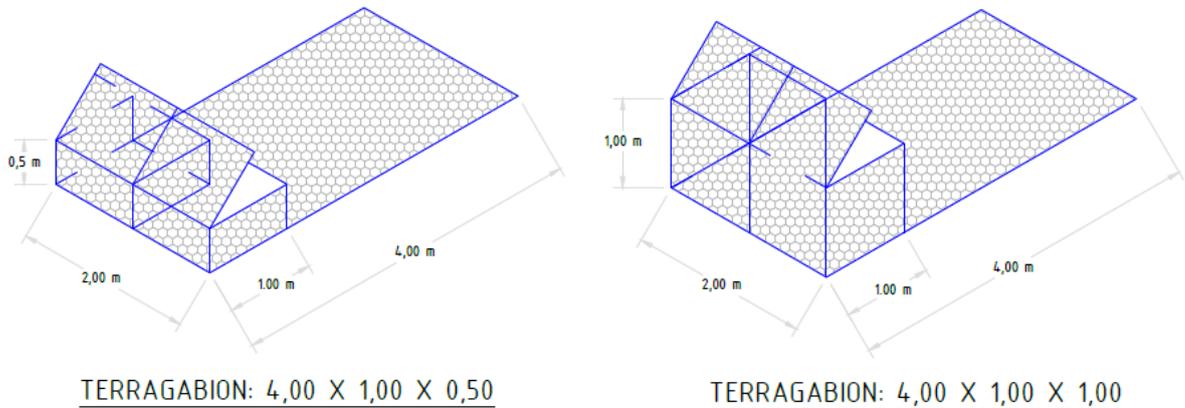


Figura 4.2 Tipos de Terragabion empleados en el proyecto.

#### 4.2.2. GEOMALLAS UNIAXIALES TIPO TERRAGRID

Las Geomallas Uniaxiales TerraGrid son geomallas tejidas producidos partir de hilos de multifilamento de poliéster de alta tenacidad y alto peso molecular, los cuales reciben revestimiento en PVC para la protección del núcleo. El producto final es resistente a los daños de instalación, ataques químicos, biológicos, ambientales y es especialmente diseñado para la estabilización de estructuras de suelo reforzado entre otras aplicaciones.

Se utilizarán en el presente proyecto geomallas Tejidas Uniaxiales TerraGrid 120.

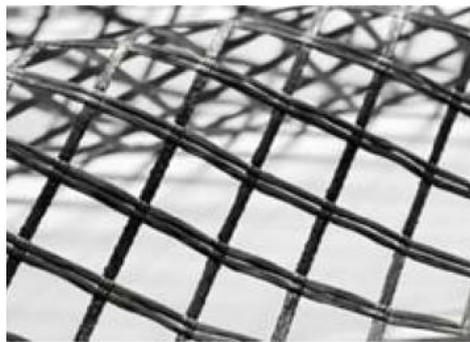


Figura 4.3 Geomalla Uniaxial TerraGrid

#### 4.2.3. FACTORES DE REDUCCIÓN PARA RESISTENCIA DE REFUERZO

Los refuerzos empleados en los modelos corresponden a las geomallas uniaxiales. Las propiedades de resistencia y sus factores de reducción de resistencia se definen en el siguiente cuadro:

**Cuadro 4.2** Factores de reducción por resistencia de Geomalla Uniaxial TerraGrid XT

	Resistencia Última Tult (kN/m)	Daños por instalación RFid(*)	Daños ambientales RFd(**)	Creep RFcr(**)	FR total
TerraGrid Uniaxial 120	120	1.03	1.10	1.43	1.62

(\*) Estimación para un rango de tamaño de materiales 0-125mm. El valor de RFid (Daños de instalación) es 1.10 para todas las geomallas.

(\*\*) Estimación para una temperatura promedio anual de 15°C y tiempo de vida útil de 50 años. El valor mín. de RFd (Daños ambientales) es 1.10

#### 4.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO GRANULAR COMPACTADO

El material de Relleno Estructural para el Muro TEM deberá de cumplir con unas propiedades mínimas necesarias para asegurar la buena interacción refuerzo-relleno que garantice a su vez la transferencia de esfuerzos del relleno al refuerzo. Estos materiales deberán de ser procesados por el Contratista de forma que cumplan con los requisitos granulométricos requeridos en el cuadro 4.3

**Cuadro 4.3** Granulometría del Relleno Estructural

Tamiz		% que Pasa
(mm)	Número	
80	3"	100
20	3/4"	50-100
5	N°4	20-50
0.08	N°200	0-15

Así mismo el material de relleno debe de cumplir con los siguientes requerimientos:

pH del Relleno : Entre 3 y 9

Material Orgánico : ≤ 1%

Compactación : 95% del Proctor Modificado

Espesor de la capa de compactación : 30cm (máximo)

% Material Fino (<#200 ASTM) : Menor al 15%

Variación en la humedad óptima : ± 2%

Tamaño Máximo T<sub>MAX</sub> : 3"

Coeficiente de Uniformidad (CU) : Mayor a 4

Índice de Plasticidad : Entre 0 y 6

Contenido de sales solubles : ≤ 1.0%

Adicional a las características anteriores, deberán cumplir las siguientes propiedades de resistencia efectivas:

Cohesión efectiva : 0 kPa.

Ángulo fricción interna efectiva : ≥ 34°

Peso Específico : 18 kN/m<sup>3</sup>.

## 5. **CARGAS**

### 5.1. **EMPUJE VERTICAL (EV)**

El empuje vertical del muro de Tierra Armada (EV) es proporcional a la altura del macizo y se establece a partir de su peso unitario mediante la fórmula:

$$EV = \gamma_1 \cdot H \cdot B$$

Dónde:

$\gamma_1$  : Peso unitario del relleno del macizo de Tierra Armada

H : Altura del muro

B : Ancho de base del muro

	<b>MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION</b>	<b>Revisión: B</b>
	<b>Código: FTA230050-MC-01</b>	<b>Fecha: 22/05/2023</b>
		<b>Página: 11 de 27</b>

## 5.2. EMPUJE HORIZONTAL (EH)

El empuje lateral del relleno contenido por el macizo (EH) se establece mediante el método de la cuña de Coulomb, en función del ángulo de fricción interna del relleno y la geometría del muro, como se indica a continuación:

$$EH = \frac{1}{2} \cdot K_a \cdot \gamma_2 \cdot H^2$$

Donde:

$K_a$  : Coeficiente de empuje activo del relleno retenido

$\gamma_2$  : Peso unitario del relleno retenido

## 5.3. CARGA VIVA (LL)

La sobrecarga considerada para el diseño de la estructura es equivalente a 12 kN/m<sup>2</sup>.

En caso sea necesario actualizar la carga o configuración de alguna de ellas, se recomienda validar la propuesta técnica transmitida.

## 5.4. CARGAS SÍSMICAS (EQ)

De acuerdo con lo establecido en los estudios realizados en el área del proyecto, las aceleraciones máximas horizontales en suelo son de 0.25g, para los análisis de estabilidad externa por métodos pseudo estáticos para muros y taludes se debe emplear un coeficiente no menor a 0.5 veces la aceleración máxima del Terreno (PGA).

Por lo tanto, el coeficiente mínimo de aceleración sísmica horizontal tomada para los análisis de estabilidad externa del muro de Tierra Armada es igual a  $A=0.123$ .

### 5.4.1. ESTABILIDAD INTERNA

El diseño sísmico indicado en AASHTO considera las fuerzas de inercia tanto en el macizo como en el relleno retenido, mediante la incorporación de un coeficiente sísmico horizontal  $A_m$ , el cual depende del coeficiente de aceleración máxima del suelo  $A$ , según se indica a continuación:

$$K_h = A_m = 0.30$$

Donde:

$A_m, K_h$  : Coeficiente de Aceleración Sísmico Horizontal.

$A$  : Coeficiente de aceleración máxima

#### 5.4.2. ESTABILIDAD EXTERNA

De acuerdo con lo indicado en la norma AASHTO, los análisis de estabilidad externa bajo condiciones sísmicas incorporan una fuerza horizontal  $P_{IR}$  debido a la inercia de una porción de la masa de suelo reforzada ( $0.5 H_2$ ) y el 50 por ciento del empuje dinámico horizontal  $P_{AE}$ , según se muestra en la Figura 5.1.

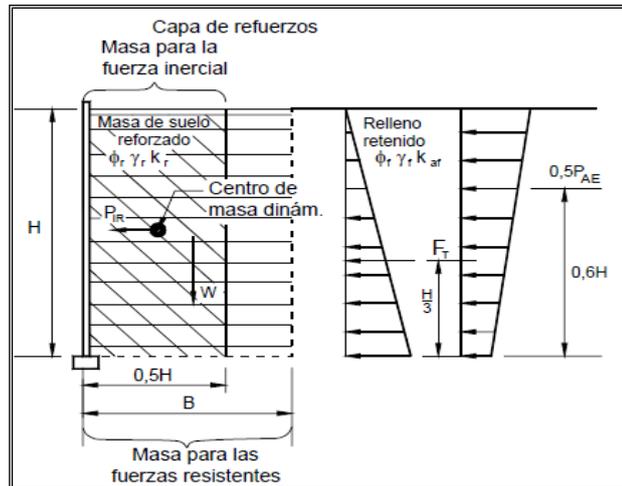


Figura 5.1 Análisis de Estabilidad Externa. Cargas Sísmicas Consideradas.

Dónde:

$$P_{IR} = 0.5 \cdot \gamma_{EQ} \cdot A_m \cdot g \cdot \gamma_s \cdot H_2 \cdot H$$

$P_{IR}$  = Fuerza inercial provocada por la aceleración del relleno reforzado

$\gamma_{EQ}$  = Factor de carga para las cargas EQ.

$A_m$  = Máximo coeficiente de aceleración del muro en el baricentro (adimensional)

$\gamma_s$  = Densidad del suelo ( $\text{kg/m}^3$ )

	<b>MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION</b>	<b>Revisión: B</b>
	<b>Código: FTA230050-MC-01</b>	<b>Fecha: 22/05/2023</b>
		<b>Página: 13 de 27</b>

- H = altura del muro (m)
- g = aceleración de la gravedad (m/sec<sup>2</sup>)
- H = Altura Muro de Tierra Armada

## 6. ESTADOS LÍMITES DE RESISTENCIA

De acuerdo con las disposiciones del código AASHTO, el diseño de muros de tierra estabilizada mecánicamente debe considerar una serie de estados límites o estados de carga, cumpliendo la siguiente ecuación para cada uno de ellos:

$$\sum \eta_i \cdot \gamma_i \cdot Q_i \leq \phi \cdot R_n$$

En donde:

$\gamma_i$  : Factor de carga asociado a un estado límite en particular

$\phi$  : Factor de resistencia asociado a un estado límite en particular

$Q_i$  : Carga considerada

$R_n$ : Resistencia nominal

$\eta_i$  : Modificador de carga

El análisis de estabilidad del muro de Tierra Armada se realizará a partir de las siguientes consideraciones de estados límites definidos por el código AASHTO [C-3.4.1]:

- Resistencia I: Combinación de cargas asociada con el fallo estructural del muro, debido a una combinación de cargas que no considere específicamente el tipo de vehículos que transitarán.
- Evento Extremo I: Combinación de cargas asociada al desempeño de la estructura ante eventos sísmicos.

De acuerdo con lo anterior, para cada nivel se debe verificar la capacidad resistente al arranque de los refuerzos y su nivel de tracciones.

### 6.1.1. FACTORES DE CARGA Y RESISTENCIA

A continuación, se indican los factores de carga y resistencia a considerar en cada uno de los estados límites a ser analizados, indicando entre corchetes su referencia en el código AASHTO.

#### 6.1.1.1. Resistencia I

- Factores de Carga para Verificación por Arranque de Refuerzos (Pullout):

Empuje vertical del muro TEM	EV=1,35	[T-3.4.1-2]
Presión lateral del terreno	EH=1,50	[T-3.4.1-2]
Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM	LS= 1,75	[T-3.4.1-1]
Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido	LS= 1,75	[T-3.4.1-1]
Sobrecarga del relleno sobre el muro y relleno retenido	ES= 1,50	[T-3.4.1-1]
Carga muerta	DL=0,90	[T-3.4.1-1]

- Factores de Carga para Verificación por Tracción Máxima en Refuerzos:

Empuje vertical del muro TEM	EV=1,35	[T-3.4.1-2]
Presión lateral del terreno	EH=1,50	[T-3.4.1-2]
Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM	LS=1,35	[T-3.4.1-1]
Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido	LS=1,35	[T-3.4.1-1]
Sobrecarga del relleno	ES= 1,50	[T-3.4.1-1]
Carga muerta	DL=1,50	[T-3.4.1-1]

- Factores de Resistencia (para ambos casos):

Resistencia a tracción del refuerzo	$\phi=0,90$	[T-11.5.6-1]
-------------------------------------	-------------	--------------

Resistencia a arranque del refuerzo  $\phi=0,90$  [T-11.5.6-1]

**6.1.1.2. Evento Extremo I**

- Factores de Carga para Verificación por Arranque de Refuerzos

Empuje vertical del muro TEM  $EV=1,35$  [T-3.4.1-2]

Presión lateral del terreno  $EH=1,50$  [T-3.4.1-2]

Cargas sísmicas  $EQ=1,00$  [T-3.4.1-1]

Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM  $LS =0,50$  [T-3.4.1-1]

Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido  $LS =0,50$  [T-3.4.1-1]

Sobrecarga del relleno  $ES= 1,50$  [T-3.4.1-1]

Carga muerta  $DL=0.90$  [T-3.4.1-1]

- Factores de Carga para Verificación por Tracción Máxima en Refuerzos

Empuje vertical del muro TEM  $EV=1,35$  [T-3.4.1-2]

Presión lateral del terreno  $EH=1,50$  [T-3.4.1-2]

Cargas sísmicas  $EQ=1,00$  [T-3.4.1-1]

Sobrecarga de tránsito sobre el muro TEM  $LS=0,50$  [T-3.4.1-1]

Sobrecarga de tránsito sobre el relleno retenido  $LS=0,50$  [T-3.4.1-1]

Carga muerta  $DL=1.50$  [T-3.4.1-1]

- Factores de Resistencia (para ambos casos)

Resistencia a tracción del refuerzo  $\phi=1,20$  [T-11.5.6-1]

Resistencia a arranque del refuerzo

$\phi=1,20$

[T-11.5.6-1]

## 7. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD INTERNA

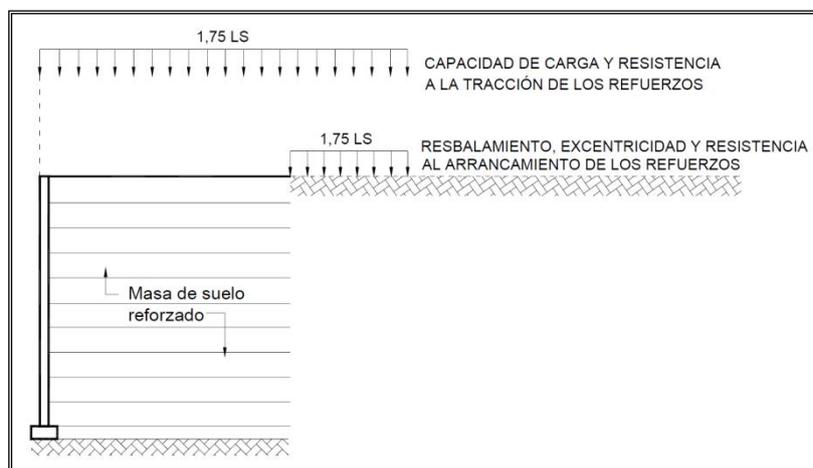
### 7.1. METODOLOGÍA

El análisis de estabilidad interna de un muro TEM consiste en la evaluación de la superficie de falla en el interior del macizo de suelo reforzado, donde se verifican las tensiones entre la masa de suelo y el refuerzo a las distintas alturas en que este se encuentra.

Los principales modos de falla considerados en el análisis de estabilidad interna y que deben ser controlados en el diseño, son los siguientes:

- *Falla por elongación o ruptura de las cintas refuerzo (Rotura)*, donde las fuerzas de tensión al interior del macizo puedan hacer que el refuerzo se elongue en forma excesiva o se rompa, generando grandes desplazamientos y el posible colapso de la estructura.
- *Falla por arranque (Pullout)*, donde las fuerzas de tensión en los elementos de refuerzo son mayores que la adherencia relleno-refuerzo, es decir, mayores que la fuerza necesaria para extraer el refuerzo fuera de la masa de suelo reforzada.

Es importante notar que para el cálculo de la falla por elongación o ruptura se utiliza la sobrecarga de tránsito ubicada en la parte superior como detrás del macizo de tierra armada, mientras que, para el cálculo de la falla por arranque, se considera únicamente la sobrecarga de tránsito ubicada detrás (no encima) del macizo, de modo de considerar las condiciones más desfavorables para el análisis, ver figura 7.1.



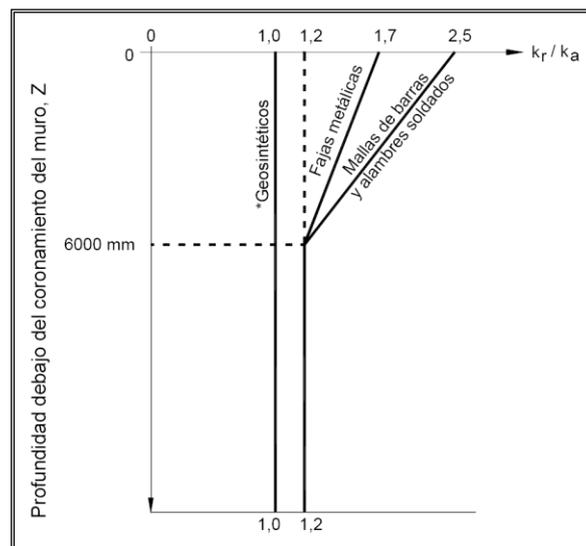
**Figura 7.1** Sobrecarga de Tránsito según Modos de Falla Considerados

Las fuerzas de tracción en cada nivel de refuerzos se determinan calculando la presión vertical equivalente en cada nivel, y posteriormente la presión horizontal actuando sobre el refuerzo.

La presión vertical resultante en cada nivel de refuerzo está en función de la presión vertical debido al peso propio del material de relleno que se encuentra por encima del nivel del refuerzo a analizar y de la sobrecarga a utilizar (dependiendo del tipo de análisis).

El esfuerzo horizontal que está sometido cada nivel de refuerzo se obtiene multiplicando la presión vertical por el coeficiente de empuje horizontal del suelo según el método AASHTO "Simplified Method".

De acuerdo con la experiencia Internacional de Tierra Armada y en base a los ensayos realizados por el grupo para el caso de Muros TEM utilizando el tipo de refuerzo "cinta polimérica" consideramos para el cálculo de la estabilidad interna el comportamiento que gobierna el cálculo es del tipo Inextensible (ver figura 7.2).



**Figura 7.2** Coeficientes Referenciales de empuje horizontal al interior del macizo de Suelo Reforzado (según método AASHTO "Simplified Method").

El punto de máxima tensión en cada nivel de refuerzo separa el material de relleno en dos partes: una zona activa entre el panel y la línea de máxima tensión y una zona resistente detrás de la línea de máxima tensión (Ver Figura 7.3). El efecto global es que las fuerzas de tensión generadas en el refuerzo por la masa de suelo en la zona activa son transferidas hacia el suelo en la zona pasiva, por medio del roce generado con el refuerzo.

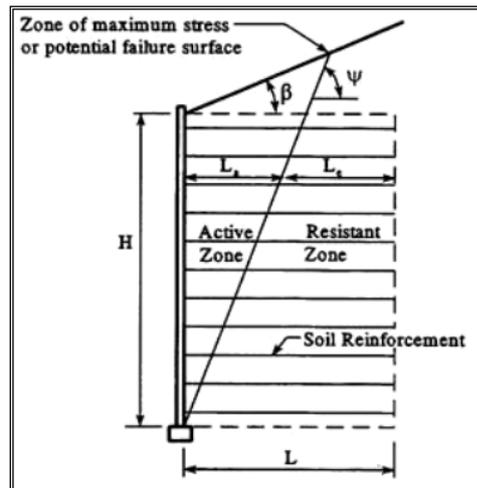


Figura 7.3 Línea de Tensión Máxima

## 7.2. CONSIDERACIONES SÍSMICAS

Para el análisis de estabilidad interna bajo consideraciones sísmicas, la ubicación de la línea de tensión máxima en los refuerzos es idéntica al caso estático. En consecuencia, para establecer los efectos dinámicos sobre el muro TEM, únicamente se debe incorporar una fuerza de inercia  $P_i$  la cual se determina mediante el producto del coeficiente de sísmico horizontal  $A_m$  y la masa de la zona activa.

El incremento de tensiones  $T_{md}$  en cada nivel "i" de refuerzos para el caso sísmico se establece mediante una distribución ponderada de la carga de inercia  $P_i$  según las áreas resistentes de cada nivel, como se muestra a continuación:

$$T_{md} = \gamma \cdot P_i \cdot \frac{L_{ei}}{\sum_{i=1}^m L_{ei}}$$

Dónde:

$\gamma$  : Factor de mayoración para las cargas sísmicas EQ = 1.00

$P_i$  : Carga de inercia

$L_{ei}$  : Longitud efectiva de los refuerzos de la capa i

m : número total de niveles de refuerzos

En consecuencia, la sollicitación total  $T_{total}$  sobre el refuerzo ubicado en el nivel "i" se determina de la siguiente manera:

$$T_{total} = T_{max} + T_{md}$$

### 7.2.1. RESISTENCIA DEL REFUERZO PARA CONDICIONES SÍSMICAS

Para condiciones sísmicas la capacidad de tracción máxima del refuerzo  $\varphi \cdot T_{nom}$  debe ser mayor que las componentes estáticas y sísmicas en cada nivel de refuerzo según se indica a continuación:

$$T_{total} = T_{max} + T_{md} \leq \varphi \cdot T_{nom}$$

Dónde:

$\varphi$  : Factor de reducción de resistencia para condición sísmica = 1.20

### 7.2.2. RESISTENCIA AL ARRANQUE PARA CONDICIONES SÍSMICAS

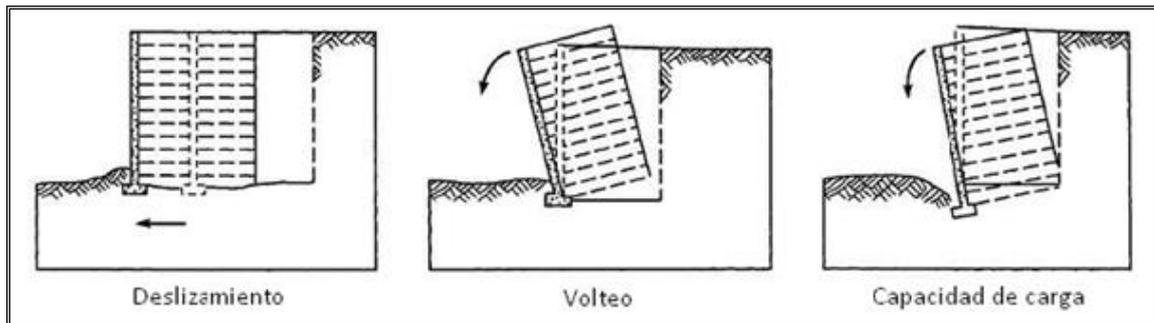
De acuerdo con la norma AASHTO, bajo condiciones de carga sísmica, el valor del factor  $F^*$  se redujo al 80% del valor utilizado para condiciones estáticas.

## 8. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EXTERNA

### 8.1. METODOLOGÍA

En la Estabilidad Externa se considera el comportamiento del macizo como un bloque rígido definido por la altura y longitud de los refuerzos. Los modos de falla considerados en este análisis involucran: límites de la excentricidad, deslizamiento y las presiones de contacto en la fundación.

De acuerdo con los Estados Límites considerados, la norma AASHTO LRFD 2010 define las verificaciones que deben realizarse, según se indica en la figura 8.1:



**Figura 8.1** Definición de las Distintas Condiciones de Falla Consideradas

Es importante notar que para la consideración de la ubicación de la sobrecarga para los cálculos de la estabilidad externa dependerá del tipo de verificación que se está realizando, ver figura 8.1.

A continuación, se destacan algunos de los aspectos que se consideraron en las verificaciones de las condiciones de falla indicadas anteriormente.

## **8.2. DESLIZAMIENTO Y EXCENTRICIDADES**

De acuerdo con los estados límites y a las condiciones de carga indicadas anteriormente se debe verificar que las (los) fuerzas (momentos) solicitantes, mayorados por los factores de carga, no superen a las (los) fuerzas (momentos) resistentes, reducidos por los factores de resistencia.

Para los muros de Tierra Armada cimentados sobre suelo, la guía de diseño FHWA NHI-10-24 considera una limitación del valor de la excentricidad en la base a un valor igual al medio central del ancho de la base de  $e/B \leq 0.25$  para condiciones estáticas y  $e/B \leq 0.40$  para condiciones pseudo estáticas.

## **8.3. CAPACIDAD DE SOPORTE**

La capacidad admisible del terreno de fundación deberá de ser superior a las presiones transmitidas por los muros TEM al nivel de su base tanto en condiciones estáticas y pseudo estáticas.

	<b>MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION</b>	<b>Revisión: B</b>
		<b>Fecha: 22/05/2023</b>
	<b>Código: FTA230050-MC-01</b>	<b>Página: 21 de 27</b>

Se realizó el análisis de la sección típica del estribo Tierra Armada, en los cuadros 8.1 al 8.4 se muestra los CDR de los diferentes mecanismos de falla; así como, las presiones transmitidas tanto para condiciones estáticas como pseudo-Estáticas.

**Cuadro 8.1** Resumen de cálculos Estabilidad Externa (Condición Estática)

Descripción	Desnivel <sup>1</sup> D (m)	Base B (m)	Condición Estática*			
			CDR Deslizamiento	CDR Volteo	Excentricidad ( $e/B \leq 0.25$ )	Presiones en la Fundación (kPa)
Muro H=13.00	14.00	11.75	2.26	5.07	0.09	297
Muro H=8.50	9.5	8.00	2.09	4.32	0.11	200

**Cuadro 8.2** Resumen de cálculos Estabilidad Externa (Condición Pseudo Estática)

Descripción	Desnivel <sup>2</sup> D (m)	Base B (m)	Condición Estática*			
			CDR Deslizamiento	CDR Volteo	Excentricidad ( $e/B \leq 0.25$ )	Presiones en la Fundación (kPa)
Muro H=13.00	14.00	11.75	1.64	3.18	0.15	341
Muro H=8.50	9.5	8.00	1.64	3.12	0.15	230

## **9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En relación con los análisis de estabilidad interna y externa de los muros del proyecto, se concluye:

- La configuración utilizada para los muros de TEM que conforman el Proyecto Mina Justa cumple con la normativa AASHTO - LRFD 2012, y presentan márgenes de seguridad adecuados en cuanto a los análisis de estabilidad interna y externa desarrollados.
- La capacidad admisible del terreno de fundación deberá de ser superior a los valores de las presiones transmitidas por los muros de Tierra Armada en el nivel de su base, los

	<b>MEMORIA DE CÁLCULO MURO TERRAGABION</b>	<b>Revisión: B</b>
		<b>Fecha: 22/05/2023</b>
	<b>Código: FTA230050-MC-01</b>	<b>Página: 22 de 27</b>

valores de las capacidades admisibles del terreno no es un cálculo realizado por Tierra Armada y deberá de ser verificado por el cliente.

- Se recomienda realizar un análisis exhaustivo de estabilidad de los taludes superiores al muro de Tierra Armada asegurando su estabilidad (Ver Anexo B)
- En general se optimizaron los largos y las cantidades de refuerzos incorporados en los muros, de modo de obtener una solución que cumpla con todos los requerimientos del proyecto, pero a la vez económica y dentro de los límites permitidos por la norma AASHTO LRFD 2012.
- Se debe de tener especial cuidado en la construcción del drenaje, asegurando que no existan infiltraciones hacia el relleno estructural del muro TEM. Los cálculos de la estabilidad del muro de tierra armada no contemplan presiones hidrostáticas.

#### 10. **REFERENCIAS**

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) “LRFD Bridge Design Specifications, 2012”
- The Federal Highway Administration (FHWA) “Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Volume I”, Publicación No FHWA-NHI-10-024.



**MEMORIA DE CÁLCULO MURO  
TERRAGABION**

**Revisión: B**

**Fecha: 22/05/2023**

**Código: FTA230050-MC-01**

**Página: 23 de 27**

# ANEXOS



**MEMORIA DE CÁLCULO MURO  
TERRAGABION**

**Revisión: B**

**Fecha: 22/05/2023**

**Código: FTA230050-MC-01**

**Página: 24 de 27**

**MURO H=13.00M  
ANÁLISIS ESTÁTICO**







**INPUT DATA: Geometry and Surcharge loads (of a SIMPLE STRUCTURE)**

Design height, Hd 13.00 [m] { Embedded depth is E = 2.50 m, and height above top of finished bottom grade is H = 10.50 m }

Soil in front of the wall is inclined at 3H:1V. Hs = 2.00 m.

Batter,  $\omega$  0.0 [deg]

Backslope,  $\beta$  30.0 [deg]

Backslope rise 1.0 [m] Broken back equivalent angle, I = 2.20° (see Fig. 25 in DEMO 82)

**UNIFORM SURCHARGE**

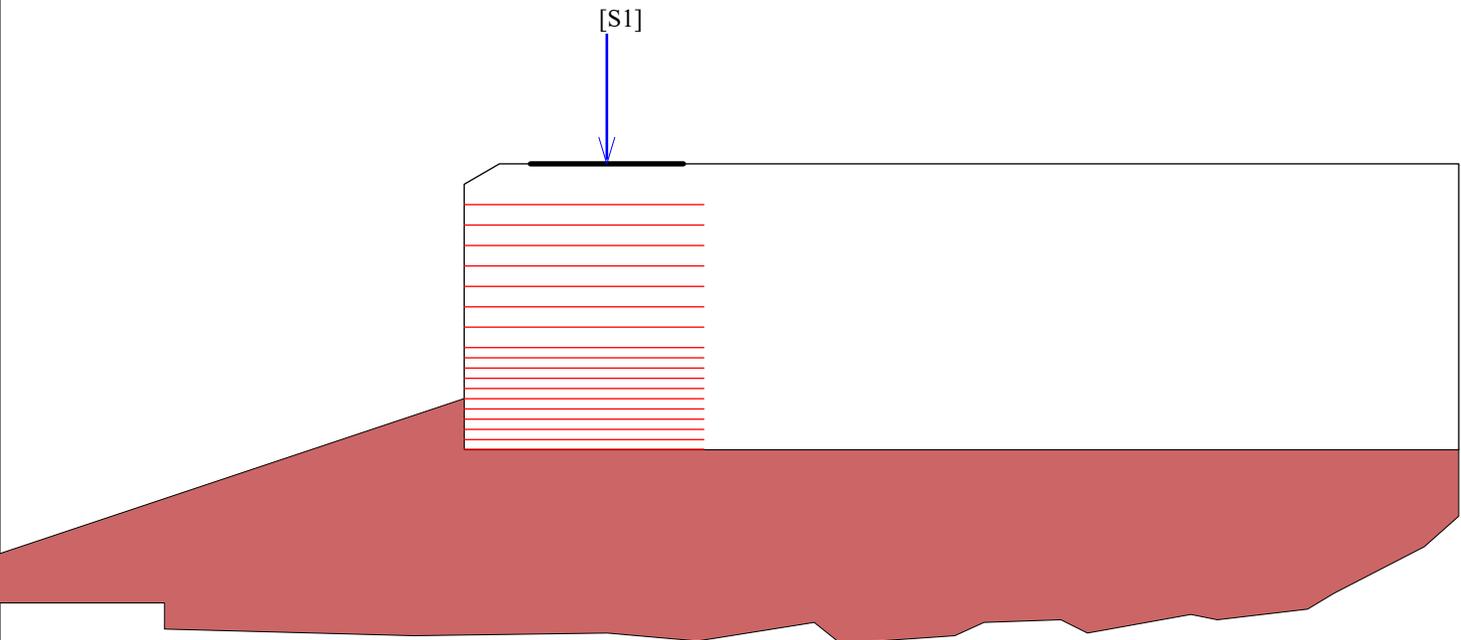
Uniformly distributed dead load is 0.0 [kPa]

**OTHER EXTERNAL LOAD(S)**

[S1] Strip Load,  $Q_v-d = 0.0$  and  $Q_v-l = 12.0$  [kPa].

Footing width,  $b=7.5$  [m]. Distance of center of footing from wall face,  $d = 7.0$  [m] @ depth of 0.0 [m] below soil surface.

**ANALYZED REINFORCEMENT LAYOUT:**



**SCALE:**

0 2 4 6 8 10 [m]













**MEMORIA DE CÁLCULO MURO  
TERRAGABION**

**Revisión: B**

**Fecha: 22/05/2023**

**Código: FTA230050-MC-01**

**Página: 25 de 27**

**MURO H=13.00M  
ANÁLISIS PSEUDO ESTÁTICO**



















**MEMORIA DE CÁLCULO MURO  
TERRAGABION**

**Revisión: B**

**Fecha: 22/05/2023**

**Código: FTA230050-MC-01**

**Página: 26 de 27**

**MURO H=8.50M  
ANÁLISIS ESTÁTICO**



















**MEMORIA DE CÁLCULO MURO  
TERRAGABION**

**Revisión: B**

**Fecha: 22/05/2023**

**Código: FTA230050-MC-01**

**Página: 27 de 27**

**MURO H=8.50M  
ANÁLISIS PSEUDO ESTÁTICO**







**INPUT DATA: Geometry and Surcharge loads (of a SIMPLE STRUCTURE)**

Design height, Hd 13.00 [m] { Embedded depth is E = 2.50 m, and height above top of finished bottom grade is H = 10.50 m }

Soil in front of the wall is inclined at 3H:1V. Hs = 2.00 m.

Batter,  $\omega$  0.0 [deg]

Backslope,  $\beta$  30.0 [deg]

Backslope rise 1.0 [m] Broken back equivalent angle, I = 2.20° (see Fig. 25 in DEMO 82)

**UNIFORM SURCHARGE**

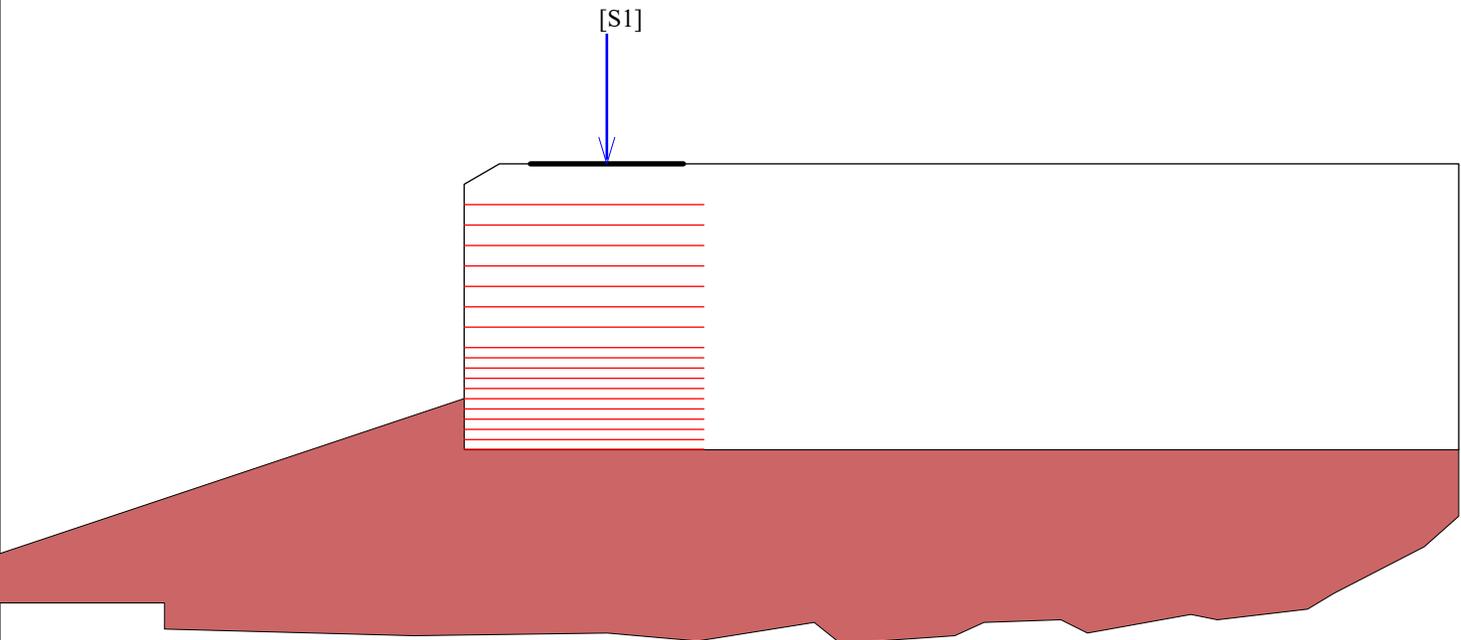
Uniformly distributed dead load is 0.0 [kPa]

**OTHER EXTERNAL LOAD(S)**

[S1] Strip Load,  $Q_v-d = 0.0$  and  $Q_v-l = 12.0$  [kPa].

Footing width,  $b=7.5$  [m]. Distance of center of footing from wall face,  $d = 7.0$  [m] @ depth of 0.0 [m] below soil surface.

**ANALYZED REINFORCEMENT LAYOUT:**



**SCALE:**

0 2 4 6 8 10 [m]









