UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS:

Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025

Para optar el título profesional de:

INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

Bach. Jhon Kenyi ESPINOZA BARRIENTOS

ASESOR:

Msc. Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ

AYACUCHO - PERÚ

2026

Resumen

La presente investigación evaluó numéricamente las deformaciones inducidas por cargas vehiculares en rellenos estructurales (terraplenes) y en el trasdós de muros de contención a lo largo del tramo EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), provincia de Huamanga, Ayacucho. Se empleó un enfoque numérico-computacional basado en el Método de Elementos Finitos implementado en PLAXIS 3D, complementado con automatización vía API y scripts en Python para la generación de geometrías, la ejecución de simulación y el post-procesamiento de resultados. El comportamiento del suelo se modeló con el modelo Hardening Soil, parametrizado a partir de la caracterización geotécnica y verificado mediante ensayos Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD). El modelo consideró mallas 3D con refinamiento en zonas de interés, condiciones de contorno elásticas y cargas dinámicas representativas del tráfico. Los resultados identificaron que el estado crítico del relleno ocurre durante los primeros 0.06 y 0.10 seg, obteniéndose asentamientos máximos corregidos de 5.336 mm en el terraplén y 5.265 mm en el trasdós del muro de contención para v=60 km/h. Asimismo, el incremento de la velocidad vehicular de 30 a 60 km/h redujo los asentamientos máximos aproximadamente en 17 % para el terraplén y 20 % para el trasdós del muro. La validación estadística presentó un RMSE de 0.0831 mm y un MAE de 0.0678 mm, confirmando la confiabilidad del modelo numérico. El análisis de sensibilidad, considerando variaciones de ±10 %, ±20 % y ±30 %, demostró que el ángulo de fricción interna es el parámetro de mayor influencia sobre las deformaciones, seguido por el módulo de elasticidad, mientras que el ángulo de dilatancia presentó una influencia poco significativa. La validación estadística mediante RMSE y MAE (valores: RMSE = 0.0256 mm, MAE = 0.0206, MAPE=5.35% mm; n = 6 puntos) confirmó la confiabilidad del modelo numérico. Se propone una metodología integradora de modelamiento 3D, automatización computacional, validación experimental y análisis de sensibilidad, que aporta criterios técnicos para optimizar el diseño geotécnico de carreteras y muros de contención, mejorando la seguridad y desempeño de la infraestructura vial.

Palabras clave: Método de Elementos Finitos, PLAXIS 3D, Hardening Soil, rellenos estructurales, cargas vehiculares, análisis dinámico, Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD).

Abstract

This study numerically evaluated the deformations induced by vehicular loads in structural fill (embankments) and on the backface of retaining walls along the section from EMP. AY-780 (Mollepata) to EMP. PE-3S (Pongora) in the province of Huamanga, Ayacucho. A numerical-computational approach based on the Finite Element Method implemented in PLAXIS 3D was used, supplemented with automation via API and Python scripts for geometry generation, simulation execution, and post-processing of results. Soil behavior was modeled using the Hardening Ground model, parameterized based on geotechnical characterization and verified through Lightweight Deflectometer (LWD) tests. The results showed that the critical state of the fill occurs during the first 0.06 and 0.10 seconds, with corrected maximum settlements of 5.336 mm on the embankment and 5.265 mm on the backface of the retaining wall for v = 60 km/h. Furthermore, increasing the vehicle speed from 30 to 60 km/h reduced the maximum settlements by approximately 17% for the embankment and 20% for the back of the wall. Statistical validation yielded an RMSE of 0.0831 mm and an MAE of 0.0678 mm, confirming the reliability of the numerical model. The sensitivity analysis, considering variations of ±10%, ±20%, and ±30%, demonstrated that the angle of internal friction is the parameter with the greatest influence on deformations, followed by the modulus of elasticity, while the angle of dilatancy had a negligible influence. Statistical validation using RMSE and MAE (values: RMSE = 0.0246 mm, MAE = 0.0219, MAPE = 5.77% mm; n = 6 points) confirmed the reliability of the numerical model. An integrated methodology combining 3D modeling, computational automation, experimental validation, and sensitivity analysis is proposed, which provides technical criteria for optimizing the geotechnical design of roads and retaining walls, thereby improving the safety and performance of road infrastructure.

keywords :Finite Element Method, PLAXIS 3D, Hardening Soil, structural fill, vehicular loads, dynamic analysis, Lightweight Deflectometer (LWD).

Introducción

El incremento del tránsito vehicular pesado en las ciudades de altura del perú, como Ayacucho ha generado la necesidad de diseñar y controlar adecuadamente los rellenos estructurales que conforman la plataforma de soporte de las carreteras. El comportamiento deformacional de estos rellenos bajo cargas dinamicas producidas por vehículos es un aspecto crítico para garantizar la durabilidad del pavimento, seguridad vial y la funcionalidad de la infraestructura.

Tradicionamente la evaluacion de deformaciones en rellenos se ha basado en métodos empíricos o correlaciones derivadas de ensayos CBR y densificación. Sin embargo, estos métodos no permiten capturar adecuadamente la interacción suelo - carga vechicular, ni las variaciones no lineales de rigidez y deformabilidad, especialmente en zonas con suelos de baja calidad, compactaciones variables y pendientes pronunciadas como las presentes en la región de Ayacucho.

En este contexto, el uso de herramientas numéricas avanzadas como PLAXIS 3D, basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF), permite simular de forma más realista el comportamiento del relleno estructural sometido a solicitaciones vehiculares, considerando aspectos como la distribución de presiones en los ejes, modos de carga, secuencias constructivas y modelos constitutivos no lineales.

El desarrollo de la presente investigación está organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo 1 - Planteamiento del problema:** Se expone el planteamiento del problema, describiendo la importancia de evaluar el comportamiento deformacional de los rellenos estructurales sometidos al tránsito vehicular y las limitaciones existentes en los métodos tradicionales de diseño y evaluación. Asimismo, se presenta la realidad problemática a nivel internacional, nacional y regional, y la delimitación de la investigación.
- **Capítulo 2 - Bases teóricas:** Se desarrolla el marco teórico de la investigación mediante la revisión de antecedentes nacionales e internacionales y se presentan las bases conceptuales de la investigación.

- **Capítulo 3 - Método de la investigación:** Se describe la metodología de la investigación, incluyendo el enfoque, tipo y diseño metodológico, así como los procedimientos para la caracterización geotécnica del terreno mediante ensayos de laboratorio y de campo. Se detalla el desarrollo del modelo numérico tridimensional en PLAXIS 3D, considerando la definición de la geometría, las dimensiones del dominio, los modelos constitutivos, los parámetros geotécnicos, los criterios de mallado, las condiciones de borde, la generación del estado inicial de esfuerzos y la construcción por etapas. Asimismo, se explica la modelación de la carga vehicular móvil mediante un análisis dinámico transitorio, incorporando la velocidad de circulación, la distribución de cargas por eje, el amortiguamiento de Rayleigh y las fronteras absorbentes. Finalmente, se desarrolla el procedimiento de calibración y validación indirecta del modelo utilizando los resultados obtenidos mediante el ensayo LWD, complementado con indicadores estadísticos para evaluar el grado de concordancia entre los resultados experimentales y numéricos.
- **Capítulo 4 - resultados:** Se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante el modelo numérico. Se evalúa el comportamiento del relleno estructural durante las etapas constructivas y bajo la acción de cargas vehiculares móviles, analizando la distribución de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en el sistema suelo–estructura y evaluando la influencia de las propiedades mecánicas del relleno sobre su comportamiento frente a solicitaciones dinámicas, permitiendo establecer conclusiones y recomendaciones orientadas al diseño y evaluación de rellenos estructurales en infraestructura vial.
- **Referencias bibliografáficas:** Se presenta información de los materiales consultados, y referenciados a los largo de la elaboración de la tesis.
- **Anexos:** Continene los resultados de los análisis de suelos, Panel fotografico de los ensayos realizados.

A mis padres, por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del esfuerzo, la perseverancia y la humildad. A ellos, que siempre confiaron en mí y me brindaron su apoyo para alcanzar cada una de mis metas y superar las dificultades con fortaleza y dignidad.

A mis hermanos, Michael, Nidia, Yesenia, Mónica y Argelia, por su cariño, comprensión y apoyo incondicional. Por estar presentes en los momentos importantes de mi vida, por sus palabras de aliento y por ser parte fundamental de este camino que hoy culmina con la realización de una de mis metas.

Agradecimientos

Al Msc. Ing. Alex Sander Ircañaupa Huamani, asesor de la presente tesis, por su orientación, acompañamiento y valiosas sugerencias durante el desarrollo de la investigación, así como por compartir sus conocimientos y brindar las recomendaciones necesarias para la culminación de este trabajo.

A los miembros del jurado, MSc. Ing. Hugo Vilchez Peña y MSc. Ing. Hemerzon Lizarbe Alarcón, por sus observaciones, recomendaciones y aportes, los cuales contribuyeron significativamente al fortalecimiento y mejora de la presente investigación.

A mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, por su amistad, apoyo y experiencias compartidas a lo largo de mi formación profesional.

Finalmente, a mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la comunidad de usuarios de PLAXIS y todos las personas que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Ayacucho, Agosto de 2026

Bach. Jhon Kenyi Espinoza Barrientos

Índice General

Resumen . . . . . **ii**
Introducción . . . . . **iv**
Dedicatoria . . . . . **vi**
Agradecimientos . . . . . **vii**
Índice General . . . . . **viii**
Índice de Figuras . . . . . **xii**
Índice de Tablas . . . . . **xv**
Glosarios . . . . . **xvi**
Lista de Acrónimos . . . . . **xvii**
Símbolos . . . . . **xviii**

Capítulo I
Planteamiento del Problema 1
1.1. Descripción del problema 1
1.1.1. A nivel Mundial 1
1.1.2. A nivel nacional 4
1.1.3. A nivel regional 5
1.2. Delimitación del problema 6
1.2.1. Espacial 6
1.2.2. Temporal 7
1.2.3. Temática y unidad de análisis 7
1.3. Formulación del problema 8
1.3.1. Problema general 8
1.3.2. Problemas específicos 8
1.4. Justificación e importancia 8
1.4.1. Justificación técnico - científica 8
1.4.2. Justificación económica 9
1.4.3. Justificación social y práctica 9
1.4.4. Transferencia tecnólogica 10
1.5. Limitaciones de la investigación 10
1.6. Objetivos 11
1.6.1. Objetivo general 11
1.6.2. Objetivos específicos 11

Capítulo II
Marco Teórico. 12
2.1. Antecedentes. 12
2.1.1. Investigaciones internacionales 12
2.1.2. Investigaciones nacionales 14
2.2. Bases teóricas 15
2.2.1. Rellenos estructurales en carreteras 15
2.2.1.1. Requisitos de los materiales para rellenos estructurales 17
2.2.1.2. Terreno de fundación del relleno estructural 17
2.2.2. Terraplenes 18
2.2.2.1. Función de los terraplenes en la infraestructura vial 18
2.2.3. Comportamiento mecánico de los suelos. 19
2.2.4. Asentamiento en suelos 19
2.2.5. Distribución de esfuerzos en el suelo 19
2.2.6. Modelos constitutivos del suelos 21
2.2.6.1. Modelo Mohr-Coulomb 24
2.2.6.2. Modelo Hardening Soil 27
2.2.7. Cargas vehiculares y solicitaciones dinámicas 36
2.2.7.1. Clasificación de cargas vehiculares. 37
2.2.8. Métodos numéricos en ingeniería geotécnica 37
2.2.8.1. Método de los elementos finitos (FEM) 38
2.2.9. Plaxis 3D. 39
2.2.9.1. Soil Test de PLAXIS 41
2.2.10. Análisis de sensibilidad 44
2.2.11. Ensayo con Deflectómetro de impacto ligero (LWD). 45
2.2.12. Calibración y validación de modelos numéricos 47
2.3. Marco conceptual. 47
2.3.1. Relleno estructural 47
2.3.2. Deformación 48
2.3.3. Asentamiento 48
2.3.4. Solicitación dinámica 48
2.3.5. carga vehicular 48
2.3.6. Método de elementos finitos (FEM) 49
2.3.6.1. Formulación matemática y procedimiento numérico del modelo de elementos finitos 49
2.3.7. Modelo constitutivo 62

2.3.8. Modelo hardening soil . . . 63
2.3.9. PLAXIS 3D . . . 63
2.3.10. Ensayo con Deflectómetro de impacto ligero (LWD) . . . 63
2.3.11. Análisis de sensibilidad . . . 63

Capítulo III
Método de la Investigación . . . 64
3.1. Enfoque . . . 64
3.2. Alcance . . . 64
3.3. Diseño de investigación . . . 65
3.4. Población y muestra . . . 65
3.4.1. Población . . . 65
3.4.2. Muestra del estudio . . . 66
3.5. Hipótesis . . . 67
3.5.1. Hipótesis general . . . 67
3.5.2. Hipótesis específicas . . . 67
3.6. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional . . . 68
3.6.1. Variable . . . 70
3.7. Técnicas e instrumentos . . . 70
3.7.1. Técnica . . . 70
3.7.2. Instrumentos . . . 70
3.8. Desarrollo del trabajo de tesis . . . 70
3.8.1. Área de estudio . . . 72
3.8.1.1. Caracterización del proyecto vial . . . 73
3.8.1.2. Clasificación vial y parámetros de diseño geométrico . . . 73
3.8.1.3. Características del tránsito y ejes equivalentes . . . 74
3.8.2. Técnicas de recolección de datos . . . 77
3.8.2.1. Datos de la geometría de la carretera . . . 77
3.8.2.2. Propiedades geomecánicas del suelo . . . 79
3.8.2.3. Definición de las cargas vehiculares . . . 92
3.8.3. Modelamiento númerico en PLAXIS 3D . . . 93
3.8.3.1. Dimensiones, tamaño y Geometría del modelo numérico . . . 93
3.8.3.2. Modelo Constitutivos y parámetros geotécnicos . . . 96
3.8.3.3. Creación de la geometría y modelación de la compactación . . . 97
3.8.3.4. Modelación de la carga vehicular . . . 99
3.8.4. Generación de la malla . . . 105
3.8.4.1. Condiciones de borde . . . 107

3.8.4.2. Fases de análisis numérico. 112
3.8.5. Validación del modelo mediante el ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD) 115
3.8.6. Modelamiento Númerico en PLAXIS 3D para un análisis paramétrico 124

Capítulo IV
Resultados 128
4.1. Análisis de resultados 128
4.1.1. Hipótesis general 128
4.2. Constrastación de la hipótesis 128
4.2.1. Hipótesis Específico 01 130
4.2.2. Hipótesis Específico 02 139
4.2.3. Hipótesis Específico 03 145
Conclusiones 150
Conclusiones. 150
Recomendaciones 151
Trabajos futuros. 152
Referencias Bibliográficas 153

Anexo A
Matriz de consistencia 160

Anexo B
Panel fotográfico. 161

Anexo C
Instrumentos de recolección y registro de datos. 164

Anexo D
Guía para la ejecución del ensayo con deflectómetro de impacto ligero TERRATEST 9000 LWD 175

Anexo E
Ensayos de laboratorio 189

Índice de Figuras

Figura 1 Sección típica de la Infraestructura del camino 16
Figura 2 Distribución de esfurzos en el terreno debido a una carga puntual. 20
Figura 3 Componentes cartesianas de las tensiones en las caras del cubo elemental y nomenclatura 21
Figura 4 Comportamientos constitutivos de los materiales 23
Figura 5 Recomendaciones para la elección del modelo según el tipo de suelo y los tipos de análisis. Línea discontinua: se puede usar, pero no se recomienda en términos de calidad de los resultados; Línea continua: se puede aplicar; Relleno verde: se recomienda. 24
Figura 6 Respuesta experimental y formulación de modelo elastoplástico perfecto 25
Figura 7 Relación hiperbólica tensión - deformación y definición de diferentes módulos en la condición de ensayo triaxial drenado 28
Figura 8 Curvas de deformación de ensayo edométrico 30
Figura 9 Superficie de la región elástica del estado tensional del suelo 31
Figura 10 Esquema grafico de elementos finitos 41
Figura 11 Simulación de un ensayo triaxial en SoilTest 43
Figura 12 Fotografía tomada en durante los estudio de campo. 46
Figura 13 Partes del equipo LWD 46
Figura 14 Sistema de puntos discretos 50
Figura 15 Fuerzas que actúan sobre un volumen material del medio continuo. 55
Figura 16 Flujograma del procedimiento numérico para el análisis dinámico 62

Figura 17 Vista panorámica de los trabajos de relleno estructural en la carretera AY-780, Km:1+050.00 y km. 1+650.00 66
Figura 18 Representación de la muestra tramo EMP. AY-780 (Mollepata) - EMP.PE -3S (Pongora) 67
Figura 19 Mapa de Ubicación satelital del proyecto 72
Figura 20 Parámetros de diseño geométrico. 73
Figura 21 Tramos Homogéneos de flujo vehicular Mollepata- Pongora 74
Figura 22 Mapa de Ubicación satelital del proyecto 74
Figura 23 Volumen vehicular por día y tipo de Vehículos Estación 01- Mollepata. . 75
Figura 24 Volumen vehicular por día y tipo de Vehículos Estación 02- Pongora . . . 76
Figura 25 Calculo de los ejes equivalentes ESAL(W18) 77

Figura 26 Geometría de la sección del muro de contención para el modelo de elementos finitos 78
Figura 27 Geometría de la sección de relleno estructural en terraplén para el modelo de elementos finitos 78
Figura 28 Trabajos de laboratorio de las calicatas, Km:1+050.0 80
Figura 29 Gráfica del módulo E_{50} para CU-101.41 82
Figura 30 Gráfica del módulo E_{50} para CU-198.42 82
Figura 31 Gráfica del módulo E_{50} para CU-300.21 83
Figura 32 Módulo de soiltest de PLAXIS 3D 89
Figura 33 Grafico del modelo Hardening soil 89
Figura 34 Módulo de soiltest de PLAXIS 3D 90
Figura 35 Grafico del modelo Hardening soil 90
Figura 36 Dimensiones del dominio del modelo de muro de contención. 94
Figura 37 Dimensiones del dominio del modelo de terraplén. 95
Figura 38 Dominio tridimensional en PLAXIS 3D para el modelo de relleno en trasdós en muro de contención 95
Figura 39 Dominio tridimensional en PLAXIS 3D en relleno de terraplén 96
Figura 40 Creación y asignación de materiales en PLAXIS 3D. 96
Figura 41 Simulación del proceso constructivo del relleno estructural en terraplenes en PLAXIS 3D 98
Figura 42 Simulación del proceso constructivo del relleno estructural en trasdós de muros de contención en PLAXIS 3D 99
Figura 43 La carga vehicular del camión C3 100
Figura 44 Asignación de la carga vehicular en PLAXIS 3D en terraplén 100
Figura 45 Asignación de la carga vehicular en PLAXIS 3D en trasdós de muro de contención 101
Figura 46 Definición de la función de movimiento en PLAXIS 3D. 102
Figura 47 Asignación de los valores de amortiguamiento. 104
Figura 48 Mallado de relleno en muro de contención en PLAXIS 3D 106
Figura 49 Mallado de relleno en terraplén en PLAXIS 3D 107
Figura 50 Condiciones de borde durante las fases estáticas. 108
Figura 51 Condiciones de borde estáticas en PLAXIS 3D 109
Figura 52 Condiciones de borde dinámicas 110
Figura 53 Condiciones de borde en PLAXIS 3D 111
Figura 54 Fase estático en PLAXIS 3D, para muro de contención 112
Figura 55 Fase dinámico en PLAXIS 3D, para muro de contención. 114
Figura 56 Stateg contruccion en PLAXIS 3D, para Terraplén 114
Figura 57 Stateg contruccion en PLAXIS 3D, para muro de contención 114

Figura 58 Trabajos de campo para el ensayo LWD (Deflectómetro de impacto ligero) 116
Figura 59 Modelamiento del ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD) en trasdó de muro de contención Plaxis 3D 118
Figura 60 Aplicación de la carga impulsiva sobre la placa circular en Plaxis 3D . . 119
Figura 61 Resultados de los ensayos LWD en Plaxis 3D 120
Figura 62 Grafico de regresión lineal 123
Figura 63 Asentamiento vs Rigidez (kN/m2) 125
Figura 64 Asentamiento vs Ángulo de fricción ϕ 126
Figura 65 Asentamiento vs Ángulo de dilatancia ψ° 127

Figura 66 Modelo del muro de contención en Plaxis 3D 129
Figura 67 Asentamientos en una Vista en 3D del modelo 131
Figura 68 Simulación del transito de la carga vehicular en terraplenes para v= 60 km/h PLAXIS 3D 132
Figura 69 Vista en planta, simulación del transito de la carga vehicular en terraplenes para v= 60 km/h PLAXIS 3D 133
Figura 70 Evolución temporal del desplazamiento vertical (Uz) 137
Figura 71 Asentamientos en una Vista en 3D del modelo 139
Figura 72 Simulación del transito de la carga vehicular en trasdós de muro de contención para v= 60 km/h PLAXIS 3D. 140
Figura 73 Vista en planta, simulación del transito de la carga vehicular en rellenos en trasdós de muro de contención para v= 60 km/h PLAXIS 3D. 141
Figura 74 Evolución temporal del desplazamiento vertical (Uz) 144
Figura 75 Asentamiento vs Rango: Caso relleno en trasdós de muro de contención148

Figura B.1Rellenos estructurales en terraplenes y trasdós de muro de contención . 161
Figura B.2Realización de la calicata y ensayos de laboratorio. 162
Figura B.3Ensayos de campos LWD (Defléctometro de impacto ligero). 163

Índice de Tablas

Tabla 1 *Parámetros que definen el modelo Hardening Soil* 32
Tabla 2 *Funciones principales del SoilTest de PLAXIS* 42

Tabla 3 *Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.* 69
Tabla 4 *Parámetros de resistencia* 80
Tabla 5 *Resultados del ensayo triaxial CU para caracterización del comportamiento esfuerzo-deformación.* 81
Tabla 6 *Resumen para la obtención del* E_{50}^{ref} 86
Tabla 7 *Propiedades de los materiales para el modelo Hardening Soil.* 88
Tabla 8 *Parámetros para el modelo Hardening Soil Calibrados.* 91
Tabla 9 *Parámetros para el modelo Mohr Coulomb* 92
Tabla 10 *Parámetros del concreto* 92
Tabla 11 *Cargas Vehiculares más incidentes del reglamento Nacional de Vehiculos (RNV)* 93
Tabla 12 *Parámetros de los modelos usados en PLAXIS 3D* 97
Tabla 13 *Estudio de convergencia de malla para el relleno en trasdós de muro de contención* 107
Tabla 14 *Resultados del ensayo de Deflectómetro de impacto ligero (LWD).* 117
Tabla 15 *Parámetros de la placa* 118
Tabla 16 *Cargas aplicadas en cada ensayo LWD en Plaxis 3D en relleno de trasdós de muro de contención* 118
Tabla 17 *Comparación con el ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD)* . . . 121
Tabla 18 *Datos analizados* 121
Tabla 19 *Indicadores estadisticos* 122
Tabla 20 *Rangos de variación* 125
Tabla 21 *Rangos de variación* 125
Tabla 22 *Rangos de variación* 126

Tabla 23 *evolución temporal de asentamiento máximos* 135
Tabla 24 *Evolución temporal de asentamiento máximos corregidos* 136
Tabla 25 *evolución temporal de asentamiento máximos.* 142
Tabla 26 *evolución temporal de asentamiento máximos corregidos* 143
Tabla 27 *Cálculo de variaciones Normalizadas para relleno en trasdós de muro de contención v=30 km/h* 146

Glosarios

Bulbo de presiones Zona del suelo donde se distribuyen los esfuerzos inducidos por una carga superficial.

Carga vehicular Acción dinámica y/o estática generada por el tránsito de vehículos sobre una superficie.

Deformación elástica Deformación recuperable al retirar la carga.

Deformación plástica Deformación permanente que permanece después de retirar la carga.

Deformación vertical Cambio en la altura del suelo debido a la aplicación de cargas.

Esfuerzo Fuerza interna por unidad de área dentro de un material.

Esfuerzo efectivo Esfuerzo transmitido entre partículas del suelo, responsable de su resistencia.

Modelo Hardening Soil Modelo constitutivo avanzado que considera rigidez dependiente del nivel de esfuerzo.

Modelo Mohr-Coulomb Modelo elastoplástico lineal que define la resistencia al corte mediante cohesión y ángulo de fricción.

Modelo constitutivo Relación matemática que describe el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo (ej. Modelo Hardening Soil, Modelo Mohr-Coulomb).

Módulo de elasticidad Parámetro que relaciona esfuerzo y deformación en el rango elástico.

Módulo de deformación Parámetro que mide la rigidez del suelo frente a cargas.

Plaxis 3D Es un programa de análisis de elementos finitos (FEA), para la ingenieria Geotécnica, utilizado para simular el comportamiento de suelos y rocas.

Relleno estructural Material seleccionado, colocado y compactado para mejorar la capacidad portante del terreno.

Simulación dinámica Análisis que considera la variación de cargas en el tiempo, como el paso de vehículos.

Lista de Acrónimos

CBR	:	California Bearing Ratio
E50	:	Módulo secante en ensayo triaxial
Eoed	:	Módulo edométrico
FEM	:	Método de Elementos Finitos
HS	:	Hardening Soil
MC	:	Mohr-Coulomb
MEF	:	Método de Elementos Finitos
MTC	:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
OCR	:	Relación de sobreconsolidación
PLAXIS	:	Software de análisis geotécnico por elementos finitos

Símbolos

ψ	Angulo de dilatancia [°]
ϕ'	Angulo de fricción
c	Cohesión [kPa]
ϵ	Deformación unitaria
ϵ_v	Deformación volumétrica
q	Esfuerzo desviador [kPa]
p'	Esfuerzo medio efectivo [kPa]
σ	Esfuerzo total [kPa]
$f(t)$	Función de carga dinámica
D	Matriz de Elasticidad
E_{50}	Modulo de elasticidad secante [kPa]
E_{eur}	Modulo de descarga y recarga [kPa]
E_{oed}	Modulo edometrico [kPa]
γ	Peso unitario del suelo [kN/m3]
γ_{sat}	Peso unitario saturado [kN/m3]
v	Relación de poisson
t	Tiempo [seg]

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1 Descripción del problema

1.1.1 A nivel Mundial

Estudios recientes han demostrado que la interacción dinámica entre las cargas vehiculares y las irregularidades estructurales genera incrementos significativos en los esfuerzos y asentamientos del sistema de soporte. Algadi and Seyedi, 2025, mediante simulaciones tridimensionales en PLAXIS 3D, evidenciaron que incluso pequeñas irregularidades estructurales producen concentraciones locales de esfuerzos y aceleran los asentamientos, especialmente cuando aumenta la velocidad de circulación. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de emplear modelos numéricos avanzados para evaluar las deformaciones inducidas por cargas móviles y mejorar el diseño y mantenimiento de las infraestructuras de transporte.

Abdelsalam and Seyedi, 2025, señalan que las solicitaciones dinámicas aplicadas al terreno generan vibraciones que se propagan a través del suelo y modifican su comportamiento mecánico, pudiendo ocasionar asentamientos, deformaciones y afectaciones en estructuras adyacentes. Mediante simulaciones tridimensionales desarrolladas en PLAXIS 3D, los autores evidenciaron que la magnitud de la respuesta del terreno depende de parámetros como la intensidad de la carga, la profundidad de aplicación y las características geotécnicas del suelo. Estos resultados resaltan la necesidad de emplear modelos numéricos avanzados para predecir el comportamiento del terreno sometido a acciones dinámicas y minimizar los riesgos asociados.

Pereira, Oliveira and Garcia, 2026, señalan que la respuesta deformacional del suelo está fuertemente condicionada por las propiedades geotécnicas y el estado de humedad, factores que modifican la capacidad portante y los asentamientos de las

estructuras de cimentación. Mediante ensayos experimentales y modelación numérica tridimensional, demostraron que la variación de las condiciones del terreno produce cambios significativos en las curvas esfuerzo-asentamiento y en la rigidez del suelo. Estos resultados evidencian la necesidad de emplear modelos numéricos para predecir con mayor precisión las deformaciones del terreno bajo diferentes condiciones de carga y comportamiento del suelo.

Ryś and Jaskuła, 2018, señalan que el tránsito de vehículos de gran tonelaje incrementa considerablemente las deformaciones y las solicitaciones internas de las estructuras de pavimento, acelerando su deterioro y reduciendo su capacidad portante. Mediante un análisis mecanicista-empírico demostraron que el paso de un vehículo sobredimensionado puede producir un nivel de daño equivalente al generado por cientos de vehículos convencionales, dependiendo del espesor y de la condición estructural del pavimento. Asimismo, evidenciaron que la evaluación de las deflexiones constituye un indicador confiable para determinar la capacidad estructural frente a cargas vehiculares excepcionales.

Podolsky, Ashlock and Williams, 2017, indican que el incremento de las cargas vehiculares pesadas genera estados complejos de esfuerzos y deformaciones que reducen la vida útil de las estructuras de pavimento. Debido a ello, resulta necesario emplear modelos numéricos basados en el método de elementos finitos para reproducir el comportamiento mecánico del sistema suelo–estructura y comparar los resultados con mediciones experimentales, mejorando así la confiabilidad de las predicciones sobre la respuesta estructural frente al tránsito de cargas excepcionales.

Yong Deng, Luo, Gu, Zhang and Lytton, 2019, señalan que la evaluación de la respuesta estructural de los pavimentos sometidos a cargas móviles constituye un desafío debido a la dificultad de obtener perfiles continuos de deflexión mediante ensayos de campo, especialmente a altas velocidades de circulación. En este contexto, la modelación tridimensional mediante el método de elementos finitos representa una alternativa confiable para reproducir el comportamiento deformacional del sistema suelo–pavimento, permitiendo analizar la influencia de la velocidad, las propiedades viscoelásticas de los materiales y el estado estructural del pavimento sobre la distribución de las deflexiones.

Xu, He and An, 2017, señalan que la interacción entre el vehículo y el pavimento

constituye un sistema dinámico acoplado, en el cual las irregularidades de la superficie generan vibraciones que modifican significativamente las cargas transmitidas al terreno. Los autores indican que los métodos tradicionales de diseño simplifican la carga vehicular como una acción estática constante, lo que conduce a una subestimación de las deformaciones y esfuerzos reales. En consecuencia, proponen que el análisis del comportamiento estructural debe considerar la interacción dinámica vehículo–pavimento para representar adecuadamente la respuesta del sistema frente al tránsito vehicular.

En la actualidad, el análisis del comportamiento de los rellenos estructurales ha evolucionado desde procedimientos empíricos hacia metodologías basadas en el método de los elementos finitos. Estas herramientas permiten representar con mayor precisión la interacción suelo–estructura y evaluar la distribución espacial de esfuerzos y deformaciones inducidas por cargas móviles. Investigaciones recientes desarrolladas mediante PLAXIS 3D demuestran que los modelos tridimensionales constituyen una alternativa confiable para analizar el comportamiento dinámico de terraplenes y muros de contención, siempre que los parámetros geotécnicos sean correctamente calibrados. (Badr and Mohammed Shafiqu, 2023; Hassan and Zakraia, 2024)

Uno de los principales desafíos identificados en la literatura científica es la adecuada caracterización de la rigidez del relleno estructural utilizada como parámetro de entrada en los modelos numéricos. Diversos autores señalan que la incertidumbre asociada a los parámetros constitutivos representa una de las principales fuentes de error en la predicción de asentamientos y deformaciones, razón por la cual recomiendan complementar los ensayos tradicionales de laboratorio con técnicas de evaluación in situ, tales como el Light Weight Deflectometer (LWD), que permite determinar el módulo dinámico de deformación de materiales granulares compactados bajo condiciones representativas de servicio. (P. R. Fleming, Frost and Rogers, 2021; Ryden et al., 2022)

Asimismo, investigaciones recientes indican que la incorporación de modelos constitutivos avanzados, como Hardening Soil (HS) y Hardening Soil Small (HSsmall), mejora significativamente la representación del comportamiento esfuerzo–deformación de los suelos granulares respecto a modelos elásticos o elastoplásticos convencionales. Estos modelos permiten considerar la dependencia de la rigidez con el nivel de

esfuerzos y reproducir con mayor precisión la respuesta del relleno estructural frente a cargas vehiculares repetidas, contribuyendo a optimizar el diseño geotécnico y reducir la incertidumbre en la estimación de deformaciones durante la vida útil de la infraestructura. (Benz, 2022; R. B. J. Brinkgreve, Kumarswamy, Swolfs et al., 2023)

1.1.2 A nivel nacional

El Perú cuenta con una extensa red vial conformada por carreteras nacionales, departamentales y vecinales, las cuales cumplen un papel fundamental en la conectividad territorial y el desarrollo económico del país. La expansión de la infraestructura vial, asociada al crecimiento de las actividades comerciales, agrícolas y mineras, ha incrementado el tránsito de vehículos pesados y, consecuentemente, las solicitaciones sobre los pavimentos y las estructuras geotécnicas que conforman la plataforma vial. En este contexto, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), mediante el Plan Nacional de Servicios e Infraestructura Logística de Transporte al 2032 (PNSILT-2032), señala que el transporte por carretera moviliza aproximadamente el 90 % de la carga total del país Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2023, evidenciando la importancia de la infraestructura vial para el transporte de mercancías.

En los proyectos viales desarrollados en el territorio peruano, especialmente en la región andina, es frecuente la construcción de terraplenes y rellenos estructurales para garantizar la estabilidad de la plataforma de rodadura en zonas con topografía accidentada. Sin embargo, estas estructuras están expuestas a cargas repetitivas generadas por el tránsito de camiones de alto tonelaje, las cuales producen deformaciones permanentes y asentamientos diferenciales que pueden afectar el desempeño funcional de la carretera y aumentar los costos de mantenimiento. El Manual de Carreteras: *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, 2014 establece criterios para la caracterización geotécnica y el control de compactación de los materiales; no obstante, la evaluación de las deformaciones bajo condiciones dinámicas continúa realizándose, en muchos casos, mediante procedimientos simplificados que no representan adecuadamente el comportamiento real del sistema suelo–estructura.

Diversas investigaciones desarrolladas en el Perú evidencian que la mayoría de

los estudios geotécnicos orientados al diseño de rellenos estructurales se basan en parámetros obtenidos mediante ensayos convencionales de laboratorio, sin incorporar metodologías de modelación numérica tridimensional ni procesos de calibración con ensayos dinámicos de campo. Esta situación limita la capacidad para predecir la distribución de esfuerzos y deformaciones inducidas por el tránsito vehicular y dificulta la evaluación del comportamiento de las estructuras durante su etapa de servicio. (Quispe et al., 2022; Vargas and Rojas, 2023)

1.1.3 A nivel regional

La región Ayacucho se caracteriza por presentar una topografía predominantemente montañosa, donde la construcción y mejoramiento de carreteras requiere la ejecución de numerosos terraplenes, cortes y rellenos estructurales para garantizar la estabilidad de la plataforma vial. Debido a las condiciones geológicas y geomorfológicas de la región, una parte importante de la infraestructura vial incorpora muros de contención y rellenos estructurales en trasdós de dichas estructuras, los cuales soportan permanentemente las cargas producidas por el tránsito vehicular. Estas condiciones incrementan la importancia de evaluar el comportamiento deformacional de los rellenos durante la etapa de servicio, especialmente en carreteras donde circulan vehículos de carga pesada. La problemática adquiere mayor relevancia en regiones con deficientes propiedades geotecnicas como Ayacucho, donde las condiciones topográficas y geotécnicas representan un desafío permanente para el diseño y conservación de carreteras. La carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) - EMP. PE (Pongora), ubicado en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga, funcionará como anillo vial uniendo:

- Ruta PE-28A (Los libertadores).
- PE-3S (La carretera longitudinal sierra sur)

Se estima un incremento del flujo vehicular en está carretera vecinal, el cual se presenta la construcción de terraplenes y muros de contención que requieren rellenos estructurales con un adecuado desempeño deformacional.

Pese a la importancia estratégica de la carretera vecinal Mollepata - Pongora, actualmente existen limitaciones significativas en estudios numéricos detallados que permitan comprender el comportamiento deformacional de rellenos estructurales bajo

condiciones reales de carga vehicular.

Durante los ultimos años se han incrementado las investigaciones sobre le comportamiento dinámico de terraplenes, rellenos reforzados y estructuras de contención mediante modelación numérica tridimensional, especialmente con herramientas como PLAXIS 3D. Sin embargo, la mayoría de estos estudios se centra en vías férreas, taludes reforzados, cimentaciones especiales o muros sometidos a tráfico en contextos distintos a las carreteras viales de la sierra.

Esta investigación, correspondiente a la rama de la ingeniería geotécnica, consiste en evaluar el comportamiento de las deformaciones producto de cargas vehiculares que soportarán los rellenos estructurales mediante modelos numéricos tridimensionales en PLAXIS 3D. Debido que estos resultados distan de ser inmediatos, es importante disponer de un modelo fiable que permita predecir dicha deformación en rellenos estructurales a partir de parámetros geotécnicos

El control geotécnico en infraestructura vial representa una de las actividades más importantes al considerar el impacto de la estabilidad del suelo en el comportamiento general de la estructura. En ese contexto, surge la necesidad de un enfoque de análisis más robusto que permita entender cómo se distribuyen las deformaciones en un relleno estructural expuesto a cargas vehiculares.

La modelación numérica mediante PLAXIS 3D ofrece una herramienta avanzada para evaluar la respuesta del suelo de manera tridimensional, permitiendo reproducir condiciones reales de carga y geometría. No obstante, su aplicación requiere criterios claros y una evaluación comparativa con estándares técnicos.

Por tanto, la pregunta central que guía esta investigación es: ¿Cómo se comportan las deformaciones en un relleno estructural sometido a cargas vehiculares, y de qué manera puede la modelación numérica tridimensional mejorar su evaluación respecto a métodos convencionales?

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Espacial

Esta investigación comprende la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), localizada en los distritos de Jesús Nazareno y Ayacucho, provincia

de Huamanga, departamento de Ayacucho. El estudio se enfoca específicamente en los sectores donde se ejecutaron rellenos estructurales en trasdós de muros de contención y en terraplenes, elementos que forman parte de la infraestructura vial y que están sometidos permanentemente a las cargas inducidas por el tránsito vehicular. La selección de este tramo responde a la presencia representativa de este tipo de estructuras geotécnicas y a la disponibilidad de información geotécnica y ensayos de campo, permitiendo desarrollar la evaluación numérica de las deformaciones mediante el software PLAXIS 3D, con el modelo constitutivo Hardening Soil, y su calibración a partir de los resultados obtenidos mediante el ensayo Light Weight Deflectometer (LWD).

1.2.2 Temporal

Todos las metodologías y las condiciones iniciales para la simulación de los modelos para determinar las deformaciones de rellenos estructurales ante solicitaciones de cargas vehiculares se desarrollan durante el periodo 2023 y 2025, proyecto que se encuentra en ejecución en el presente año.

1.2.3 Temática y unidad de análisis

La presente investigación evalúa numéricamente las deformaciones inducidas por cargas vehiculares en rellenos estructurales utilizados en infraestructura vial. La unidad de análisis está conformada por los rellenos estructurales empleados en la conformación de mejoramiento de terraplenes y el trasdós de muros de contención de la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), ubicada en los distritos de Jesús Nazareno y Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho. La evaluación se realiza mediante un modelo numérico tridimensional desarrollado en PLAXIS 3D, utilizando el modelo constitutivo Hardening Soil, con parámetros geotécnicos calibrados a partir de ensayos de laboratorio y del Light Weight Deflectometer (LWD).

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿Cómo determinar las deformaciones en rellenos estructurales por solicitaciones de cargas vehiculares mediante el análisis numérico en el Camino Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Cómo determinar las deformaciones de los rellenos estructurales por solicitaciones de cargas vehiculares en conformación de terraplenes en el Camino Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho?
- ¿Cómo determinar las deformaciones de los rellenos estructurales por solicitaciones de cargas vehiculares en conformación de material de relleno en el trasdos de un muro de contención en la carretera Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho?
- ¿Cómo influyen los parámetros geotécnicos del relleno en la magnitud de las deformaciones?

1.4 Justificación e importancia.

1.4.1 Justificación técnico - científica

El empleo de PLAXIS 3D como herramienta de análisis numérico se fundamenta en investigaciones que han demostrado su capacidad para reproducir el comportamiento deformacional de materiales granulares cuando se emplean parámetros geotécnicos correctamente calibrados. (Antonov, Al-Naqdi, Monastyrev, Pakhomova and Amelin, 2021) evidenciaron que la representación adecuada del módulo de deformación permite obtener resultados numéricos consistentes con los ensayos experimentales, lo que respalda la utilización de este software para analizar el comportamiento de rellenos

estructurales sometidos a cargas externas.

La presente investigación aborda la brecha existente en la representación del comportamiento dinámico de rellenos estructurales frente a solicitaciones vehiculares, superando los enfoques estáticos y empíricos comúnmente usados en proyectos viales. Mediante modelación tridimensional por Elementos Finitos (PLAXIS 3D) y la adopción del modelo constitutivo Hardening Soil, el estudio permite capturar la no linealidad del suelo, la distribución espacial de deformaciones y las respuestas transitorias ante cargas dinámicas. La calibración y validación con ensayos in situ (LWD) fortalecen la rigurosidad científica del trabajo, reduciendo la incertidumbre en parámetros geotécnicos y mejorando la capacidad predictiva del modelo. Además, el análisis de sensibilidad sistemático aporta conocimiento sobre la influencia relativa de parámetros (ángulo de fricción, módulos de rigidez, dilatancia), lo que constituye un avance metodológico útil para investigaciones posteriores y para la formulación de modelos regionales de comportamiento de suelos en Ayacucho.

1.4.2 Justificación económica

La presenta investigación tiene un impacto económico significativo debido a que una estimación más precisa de las deformaciones de los rellenos estructurales permite optimizar el diseño geotécnico y reducir intervenciones correctivas durante la vida útil de la infraestructura vial. La identificación temprana de sectores con mayor susceptibilidad a asentamientos contribuye a disminuir los costos asociados al mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico y rehabilitación de pavimentos, así como los costos indirectos ocasionados por restricciones del tránsito, desvíos vehiculares y pérdida de productividad. Asimismo, la utilización de modelos numéricos calibrados disminuye la necesidad de rediseños durante la etapa constructiva, optimizando el uso de materiales y recursos económicos en proyectos viales desarrollados por entidades públicas y privadas.

1.4.3 Justificación social y práctica

La presente investigación contribuye a la reducción de riesgos viales asociados a deformaciones excesivas de los rellenos estructurales, tales como asentamientos diferenciales, pérdida de regularidad superficial del pavimento, fisuración, deterioro

acelerado de la estructura vial y disminución de la seguridad durante la circulación vehicular. La identificación de estos fenómenos mediante simulaciones numéricas permite establecer medidas preventivas antes de la aparición de fallas, incrementando la seguridad de los usuarios y reduciendo la probabilidad de accidentes relacionados con deformaciones del terreno de fundación.

1.4.4 Transferencia tecnólogica

La investigación genera una metodología reproducible basada en PLAXIS 3D y ensayos LWD, que puede ser implementada por consultoras de ingeniería, gobiernos regionales, municipalidades, instituciones públicas y universidades para evaluar el comportamiento de rellenos estructurales en proyectos de infraestructura vial. Asimismo, los procedimientos de calibración, validación y análisis de sensibilidad desarrollados pueden incorporarse como protocolos técnicos para futuros estudios geotécnicos, fortaleciendo las capacidades locales y promoviendo la aplicación de herramientas numéricas avanzadas en la práctica profesional.

1.5 Limitaciones de la investigación.

La presente investigación se desarrolla en el ámbito de las carreteras vecinales del departamento de Ayacucho y se limita al análisis del comportamiento deformacional de los rellenos estructurales bajo condiciones representativas de la zona de estudio. En ese sentido, los parámetros geotécnicos empleados corresponden a las características propias de los materiales existentes en el proyecto, así como a las condiciones iniciales definidas para la simulación numérica.

El estudio se restringe a la evaluación de las deformaciones generadas en partidas específicas donde se emplean rellenos estructurales, tales como la conformación de terraplenes y el relleno en trasdós de muros de contención. Asimismo, el análisis considera la influencia de las cargas vehiculares transmitidas a través del bulbo de presiones, con el fin de estimar la respuesta deformacional del sistema suelo-estructura. Sin embargo, la investigación no contempla la variación temporal de largo plazo asociada a procesos de consolidación, degradación progresiva de materiales o cambios climáticos estacionales, salvo en la medida en que estos efectos estén representados indirectamente en los parámetros adoptados para el modelo.

De igual manera, el alcance del estudio se enfoca en condiciones particulares del proyecto vial evaluado, por lo que sus resultados deben interpretarse dentro del contexto geotécnico y geométrico específico de la zona de Ayacucho. En consecuencia, la extrapolación de los resultados a otras vías vecinales o a condiciones de suelo diferentes deberá realizarse con criterios técnicos y verificación adicional.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general.

- Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales a través del análisis numérico por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.

1.6.2 Objetivos específicos.

- Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales en la conformación de terraplenes por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.
- Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales en la conformación de relleno en el trasdos de los muros de contención por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera VecinalEMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.
- Analizar la influencia de los parámetros geotécnicos en la respuesta deformacional del relleno.

Capítulo II

Marco Teórico.

2.1 Antecedentes.

2.1.1 Investigaciones internacionales

El Koufachy, Seyedi and Saedi, 2025 en su investigación titulado: "3D Modelling of Pavement Deflections Considering the Variations in Temperatures, Moving Vehicle Speeds, and Axle Loads", desarrollaron un modelo tridimensional mediante PLAXIS 3D para evaluar las deflexiones de pavimentos considerando simultáneamente la temperatura, la velocidad del vehículo y la configuración de las cargas por eje. Los autores realizaron 32 simulaciones numéricas variando temperaturas entre 4 °C y 30 °C y velocidades entre 60 y 120 km/h. Los resultados mostraron que el incremento de la temperatura produce mayores deflexiones debido a la disminución de la rigidez del pavimento, mientras que el aumento de la velocidad reduce las deformaciones por el menor tiempo de interacción carga-estructura. Asimismo, demostraron que cargas desiguales entre ruedas desplazan el punto de máxima deformación hacia la rueda de mayor carga. Este estudio confirma la utilidad del método de elementos finitos mediante PLAXIS 3D para representar la respuesta mecánica de estructuras sometidas a cargas móviles.

Fernández and Medina, 2017 en su investigación titulado: "Methodology for Predicting Vibrations Induced by Underground Railways in 2D Numerical Models: A Real Case in Madrid, Spain", desarrollaron una metodología para predecir las vibraciones generadas por ferrocarriles subterráneos mediante modelos numéricos bidimensionales de elementos finitos formulados en el dominio del tiempo. La metodología considera la aplicación de cargas dinámicas equivalentes sobre los rieles y la utilización de coeficientes de corrección obtenidos mediante la comparación entre modelos 2D y 3D,

permitiendo representar la propagación de vibraciones en el terreno. La propuesta fue validada con un caso real en Madrid (España), obteniéndose una adecuada concordancia entre las simulaciones numéricas y las mediciones experimentales, lo que demuestra la confiabilidad del enfoque numérico para analizar problemas dinámicos en ingeniería geotécnica.

Chen et al., 2022 investigaron el comportamiento dinámico de un sistema pavimento–terraplén sometido a cargas de tránsito mediante ensayos in situ y modelación numérica. El estudio consideró una prueba de circulación de un camión y un modelo bidimensional desarrollado mediante el método de elementos discretos, aplicando diferentes cargas móviles armónicas cíclicas. Los resultados evidenciaron que la respuesta dinámica disminuye con la profundidad debido a la atenuación de la carga durante su transmisión a través del terraplén. Asimismo, se identificó una importante absorción de energía en la estructura del pavimento y un comportamiento histerético en el suelo situado a mayores profundidades. Los autores también determinaron las profundidades sensible y de influencia de las cargas dinámicas, encontrando que las características de rigidez del material del terraplén pueden modificar la concentración de esfuerzos y el alcance de la influencia de la carga.

Yong Deng et al., 2019 en su investigación titulado: "3D simulation of deflection basin of pavements under high-speed moving loads", desarrollaron un análisis tridimensional de asentamientos para un terraplén carretero construido sobre depósitos aluviales blandos en Taree (Australia). La investigación empleó el método de elementos finitos mediante PLAXIS 3D, elaborando un modelo geotécnico tridimensional basado en investigaciones de campo. El análisis consideró las etapas constructivas del terraplén, la aplicación de precarga y las sobrecargas de tránsito a largo plazo mediante un análisis de consolidación. Posteriormente, los resultados fueron comparados con un programa de monitoreo desarrollado durante ocho meses, permitiendo calibrar y refinar las predicciones numéricas de asentamiento. Los autores concluyeron que la modelación tridimensional constituye una herramienta confiable para estimar la magnitud y evolución temporal de los asentamientos, optimizar los períodos de precarga y reducir el riesgo de deformaciones excesivas en las estructuras asociadas al terraplén.

2.1.2 Investigaciones nacionales

Gamero, 2021, en su tesis titulada: **"Analisis comparativo de rellenos estructurales utilizando relleno fluidos y relleno con material de prestamo en la subestructura del puente Peña ubicado en el Km 33+300 del distrito de Ignacion Escudero, provincia de Sullana, region Piura"**, aborda la problemática de la baja capacidad portante de los suelos locales y la dificultad para encontrar materiales de préstamo con propiedades mecánicas óptimas para rellenos estructurales. Como solución innovadora y sostenible, plantea reutilizar el material de corte de la propia obra para la dosificación y preparación de un mortero fluido de baja resistencia. Mediante un enfoque experimental, demostrando que este relleno fluido estabilizado alcanza propiedades mecánicas óptimas, elimina la necesidad de compactación mecánica pesada y reduce los asentamientos diferenciales en la subestructura.

Huamán, 2021, en su tesis titulada: **"Aplicación del método de elementos finitos para la evaluación comparativa en el cálculo de deformaciones en pavimentos de obras viales urbanas, Cusco"**, evalua y compara las deformaciones y esfuerzos generados en la estructura del pavimento y sus capas de relleno antes las solicitaciones de tránsito vehicular pesado, mediante el método de elementos finitos, donde lográ identificar las zonas críticas con mayor tendencia al ahuellamiento y deformación plástica permanente por cargas repetitivas, concluyendo que la rigidez de las capas de soporte influye directamente en la vida útil de la infraestructura.

Herhuay, 2024 en su tesis **"Mejora de las propiedades mecánicas del suelo con el uso del relleno fluido de resistencia controlada como sustituto del relleno estructural convencional, Pasco 2022"**, indica que la conformación de rellenos estructurales mediante el método convencional de compactación por capas presenta severas limitaciones técnicas en proyectos de infraestructura vial, señala que este proceso tradicional es altamente susceptible a fallas operativas y climáticas; por un lado, una energía de compactación excesiva puede inducir el agrietamiento del material, mientras que, por otro lado, la exposición a lluvias o agentes externos de humedad en suelos finos genera el fenómeno de acolchonamiento (deformación elástica excesiva), impidiendo alcanzar la densidad máxima seca requerida. Como alternativa, su estudio demuestra que el Relleno Fluido de Resistencia Controlada (RFRC) mitiga

estas desventajas al prescindir de la compactación mecánica, garantizando una ganancia homogénea de las propiedades mecánicas del suelo.

Ramos Dedios and Garagorri Linares, 2026, desarrollaron la tesis Diseño de un terraplén de gran altura para un proyecto de infraestructura vial, con el objetivo de establecer una metodología para el diseño geotécnico de un terraplén de 25 m de altura en un proyecto vial ubicado en el Perú. La investigación empleó análisis de estabilidad mediante Slide 2 y análisis de deformaciones y asentamientos utilizando el Método de Elementos Finitos en PLAXIS 2D, además de evaluar los desplazamientos horizontales por acción sísmica mediante metodologías simplificadas. Los resultados mostraron que el terraplén presentó un comportamiento estable frente a condiciones estáticas y sísmicas, cumpliendo los factores de seguridad establecidos y manteniendo los asentamientos y deformaciones dentro de los límites admisibles. Los autores concluyeron que la metodología propuesta constituye una herramienta adecuada para el diseño geotécnico de terraplenes de gran altura en proyectos de infraestructura vial.

2.2 Bases teóricas

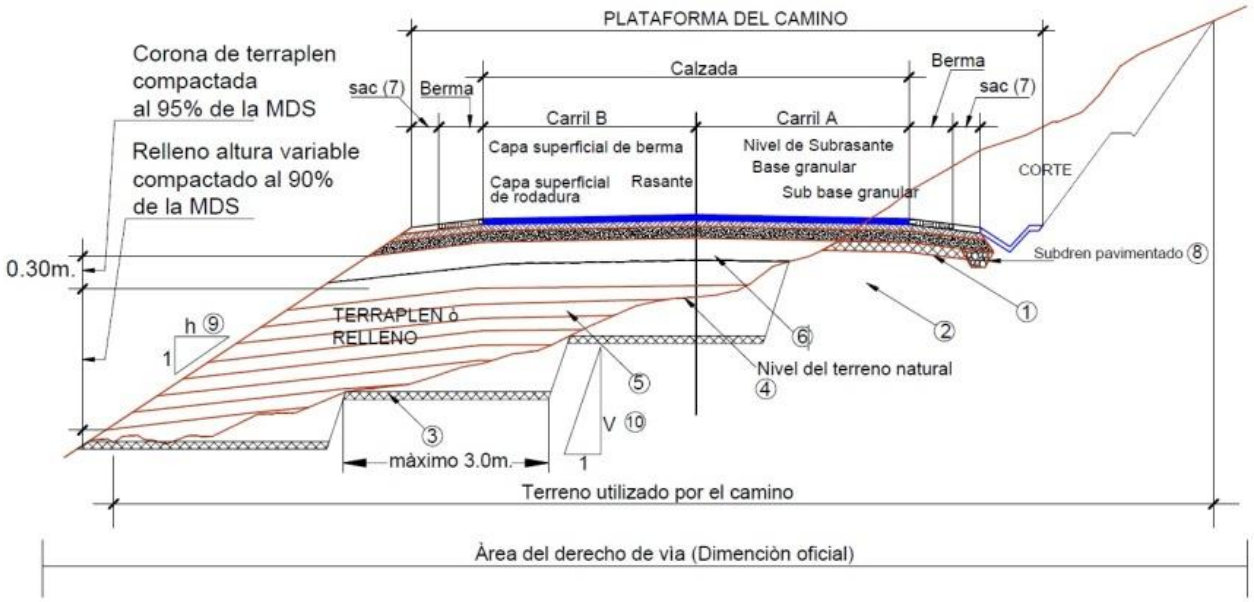
2.2.1 Rellenos estructurales en carreteras

De acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, el relleno estructural se describe como un material granular que se coloca y compacta en capas de manera controlada con el objetivo de soportar y transferir cargas estructurales al terreno de fundación, asegurando estabilidad, resistencia y manejo de deformaciones. (*Manual de carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, EG-2013)

Según el *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, 2014, los materiales de relleno estructural son elementos esenciales de la infraestructura de carreteras y es necesario que cumplan con estándares de calidad, compactación y propiedades mecánicas particulares para garantizar el correcto funcionamiento de pavimentos y estructuras relacionadas.

Figura 1

Sección típica de la Infraestructura del camino



Nota: *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, 2014

A diferencia de un relleno habitual, el relleno estructural necesita satisfacer rigurosos requisitos geotécnicos relacionados con la resistencia, la deformabilidad y la longevidad, asegurando un rendimiento apropiado ante cargas tanto estáticas como dinámicas.

La relevancia de los rellenos estructurales en proyectos de carretera desempeña roles importantes en la infraestructura.

- Transferir cargas del pavimento y del tránsito vehicular.
- Reducir deformaciones y asentamientos diferenciales.
- Proporcionar estabilidad a estructuras como estribos, muros de contención y terraplenes.
- Mejorar las condiciones del suelo natural cuando este presenta baja capacidad portante.

Según *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, 2014, la correcta planificación y realización de los rellenos estructurales es crucial para evitar fallos anticipados en el pavimento, deformaciones inusuales y dificultades de estabilidad general.

La normativa respecto a los rellenos estructurales en Perú se fundamenta en gran medida, los siguientes documentos emitidos por la MTC.

- Manual de Carreteras: Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección suelos y pavimentos R.D. N°10 - 2014-MTC/2014.
- Manual de Carreteras: Especificaciones técnicas generales para construcción - EG-2013
- Manual de Diseño Geomeétrico de carreteras.

Estas directrices definen los requisitos técnicos básicos para la elección de materiales, métodos de edificación, supervisión de calidad y aprobación de rellenos estructurales

2.2.1.1 Requisitos de los materiales para rellenos estructurales

EL *Manual de carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, EG-2013, establece los requisitos mínimos que deben cumplir los materiales empleados como rellenos estructural.

Entre los requisitos se encuentran:

- Clasificación AASTHO A-1 o A-2 preferentemente.
- Índice plástico (IP) generalmente menor a 6-12%, dependiendo de la ubicación.
- Ausencia de materia organica.
- Capacidad de soporte (CBR) acorde a nivel estructural.

Estos parámetros se verifican mediante ensayos normalizados como:

- Granulometría (ASTM D422)
- Límites de Atterberg (ASTM D4318)
- Ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557)
- Ensayo CBR (ASTM D1883)

De acuerdo con Braja M. Das, 2010, menciona que el desempeño de un terraplén esta influenciado por la relación entre el material comprimido y el terreno base, sobre todo en lo que respecta a la resistencia y la capacidad de compresión.

2.2.1.2 Terreno de fundación del relleno estructural

Antes de todo, es importante llevar a cabo una evaluación del terreno de fundación para verificar que sea adecuado para las estructuras de relleno. De acuerdo con lo indicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, cuando el terreno muestra:

- Baja resistencia al corte.
- Alta compresibilidad.

- Saturación permanente.

Se deben aplicar medidas de mejoramiento, tales como:

- Reemplazo de suelo.
- Esbilización mecánica o química.
- Uso de geosintéticos.
- drenaje del terreno.

2.2.2 Terraplenes

De acuerdo con el *Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones*, 2014, el terraplén se refiere a la sección de la explanación ubicada sobre el suelo preparado. Este se conoce también como relleno. La base y el cuerpo del terraplén o relleno deben construirse en capas de hasta 0.30 m y deben ser compactadas al 90% de la máxima densidad seca conforme al ensayo proctor modificado. La parte superior del terraplén, conocida como corona, tendrá un espesor mínimo de 0.30 m y deberá formarse en capas de 0.15 m, compactadas al 95% de la máxima densidad seca según el ensayo proctor modificado.

2.2.2.1 Función de los terraplenes en la infraestructura vial

Según el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, los terraplenes cumplen funciones principales:

- Proporcionar soporte estructural a la calzada.
- Transmitir las cargas vehiculares al terreno de fundación.
- Reducir irregularidades topográficas.
- Garantizar la estabilidad geométrica y estructural de la vía.

EL rendimiento apropiado del terraplén es crucial para la durabilidad del asfalto y el comportamiento estructural de la vía.

Los terraplenes constituyen elementos estructurales destinados a elevar la rasante de la carretera y proporcionar una plataforma estable para la circulación vehicular. Su comportamiento depende de las propiedades mecánicas del material de relleno, de las características del terreno de fundación y de las cargas transmitidas por el tránsito, siendo los asentamientos uno de los principales indicadores del desempeño estructural. (Obradović and Jocković, 2026)

2.2.3 Comportamiento mecánico de los suelos.

Los terrenos son materiales diversos, no uniformes y con comportamiento no lineales, cuya mecánica se ve influenciada por las tensiones, el historial de cargas aplicadas, la cantidad de humedad y su organización intena. A diferencia de los materiales elásticos perfectos, los terrenos exhiben características de plasticidad, dilatación, aumentos de resistencia, reducción de rigidez y son sensibles al trayecto de carga, lo que requiere la implementación de modelos constitutivos para caracterizar su relación esfuerzo - deformación. (Braja M Das and Sivakugan, 2016; Wood, 1990)

En el ámbito de la geotecnia, es esencial representar adecuadamente cómo se comporta el suelo para evaluar la estabilidad, las deformaciones y la capacidad de carga de construcciones como terraplenes, rellenos y pavimentos.

2.2.4 Asentamiento en suelos

En el campo de la ingeniería geotécnica, los asentamientos son unos de los aspectos más cruciales a tener en cuenta que al planificar cimientos y edificaciones que reposan sobre el terreno. Los asentamientos se refieren al movimiento hacia abajo que sufre el terreno al recibir una carga externa.

Braja M Das and Sivakugan, 2016; Wood, 1990, mencionan que el asentamiento se origina por la presión del terreno, lo cual puede ser generada por cambios, reordenamientos y/o la salida de agua y aire desde los espacios entre las partículas del terreno.

2.2.5 Distribución de esfuerzos en el suelo

La teoría de distribución de esfuerzos en suelos definida por Boussinesq, 1885, quien determino la respuesta elástica para cargas puntuales en un semiespacio.

Más tarde, Terzaghi, 1943 determinó que las deformaciones del suelo están vinculadas al esfuerzo efectivo y la capacidad de compresión del material.

Estas teorías permiten estimar:

- Incremento de esfuerzos verticales.
- Asentamiento inmediatos.
- Distribución de presiones bajo terraplenes.

A partir de esta solución, es posible calcular el incremento de esfuerzo vertical $\Delta\,\sigma_z$, en cualquier punto de suelo mediante:

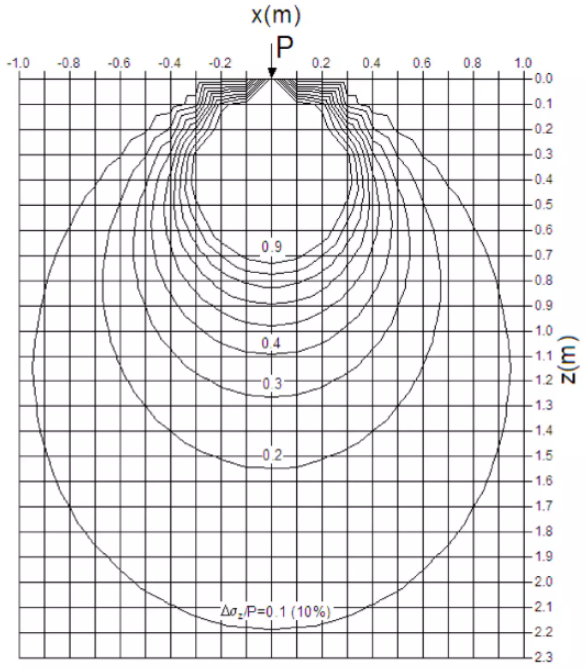
$$\Delta\,\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2}.\frac{1}{(1+(r/z)^2)^{5/2}} \tag{2.1}$$

donde:

- Q: carga puntual
- z: profundidad
- r: distancia radial

Figura 2

Distribución de esfurzos en el terreno debido a una carga puntual



Nota: Boussinesq, 1885

Según Boussinesq, 1885, los bulbos de presión se representan mediante líneas de igual incremento de esfuerzo denominadas isóbaras. Estas curvas delimitan regiones donde el esfuerzo es constante.

Los factores que influyen en la geometría y magnitud de presión dependen de:

- Tipo carga(puntual, linal, distribuida)
- Dimensiones de la cimentación
- Magnitud de la carga aplicada
- profundidad de análisis

2.2.6 Modelos constitutivos del suelos

Un modelo constitutivo es una formulación matemática que describe la relación entre esfuerzos, deformaciones y variables internas de un material bajo determinadas condiciones de carga y drenaje. En geotecnia, estos modelos permiten simular el comportamiento del suelo bajo cargas estáticas y dinámicas, constituyen la base de los análisis numéricos mediante el método de los elementos finitos. (Puzrin, 2012)

Formulación matemática de modelos constitutivos

$$\Delta\sigma = D\Delta\varepsilon \tag{2.2}$$

Donde:

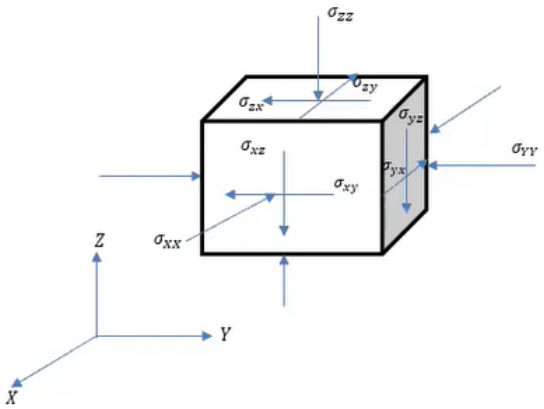
- $\Delta\sigma$: Variación de esfuerzos.
- D: Ecuación constitutiva.
- $\Delta\varepsilon$: Variación de deformaciones

Componentes de un tensor de Esfuerzos

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Figura 3

Componentes cartesianas de las tensiones en las caras del cubo elemental y nomenclatura



Nota: Obtenido de Olivella y saracibar, 2002

Componentes de un tensor de Deformaciones

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

El comportamiento mecánico del suelo se caracteriza por una respuesta no lineal, condicionada por el estado tensional y la trayectoria de carga a la que está sometido. En este contexto, los modelos constitutivos tradicionales, como el modelo elástico lineal y el criterio de Mohr-Coulomb, presentan limitaciones para describir con precisión la relación esfuerzo-deformación bajo distintas condiciones de confinamiento y niveles de solicitación. Por ello, en el análisis geotécnico actual se recurre a modelos constitutivos avanzados que permiten representar de manera más detallada la variación de la rigidez, la resistencia al corte y las deformaciones del suelo en función de las condiciones de carga, proporcionando una aproximación más realista de su comportamiento mecánico. (Potts, Zdravković, Addenbrooke, Higgins and Kovačević, 2001; Wood, 1990)

Todo modelo constitutivo en geotecnia se compone de:

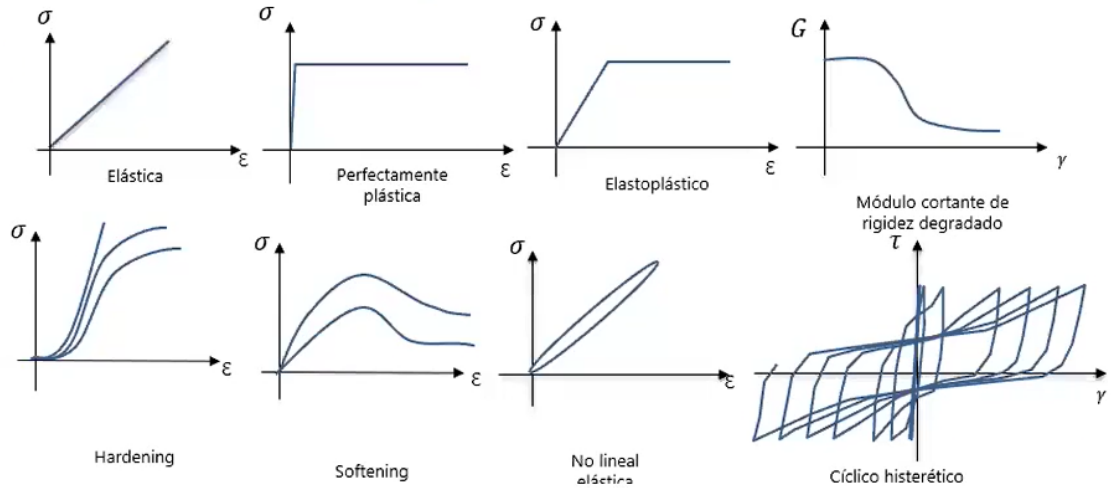
- **Ley elastica:** relaciona esfuerzos y deformaciones reversibles
- **Criterio de falla:** define el límite de resistencia del suelo.
- **Regla de flujo:** establece la dirección de las deformaciones plásticas.
- **Ley de endurecimiento:** ablandamiento: describe la evolución de la resistencia con la deformación.

Estos componentes permiten representar adecuadamente la respuesta del suelo bajo distintos estados de carga. (Desai and Siriwardane, 1984)

Los modelos constitutivos del suelo se pueden clasificar como modelos elásticos, plásticos y elastoplásticos; en dependencia de si se considera en el modelo solo deformación elástica, plástica o ambas.

Figura 4

Comportamientos constitutivos de los materiales

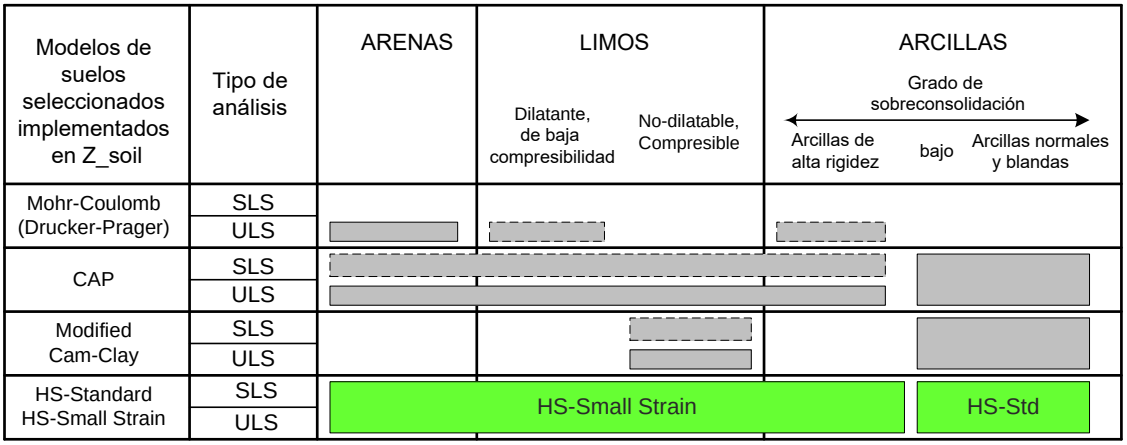


Nota: Tomada de Olivella y saracibar, 2002

La selección del modelo constitutivo está condicionada por diversos factores, entre los que destacan el objetivo del análisis, el nivel de precisión requerido y la información disponible sobre las propiedades geotécnicas del suelo. En particular, la elección debe considerar si el estudio está orientado a evaluar el estado límite último (ULS) o el estado límite de servicio (SLS). Para los análisis de servicio, resulta especialmente importante emplear modelos constitutivos capaces de representar con mayor precisión la relación tensión-deformación, debido a la necesidad de estimar adecuadamente los desplazamientos y asentamientos del terreno. En este sentido, los modelos constitutivos avanzados ofrecen una representación más realista del comportamiento del suelo que los modelos elásticos lineales y elastoplásticos perfectamente plásticos convencionales. En la figura 5 se presenta esquemáticamente una aplicación general de los modelos constitutivos.

Figura 5

Recomendaciones para la elección del modelo según el tipo de suelo y los tipos de análisis. Línea discontinua: se puede usar, pero no se recomienda en términos de calidad de los resultados; Línea continua: se puede aplicar; Relleno verde: se recomienda.



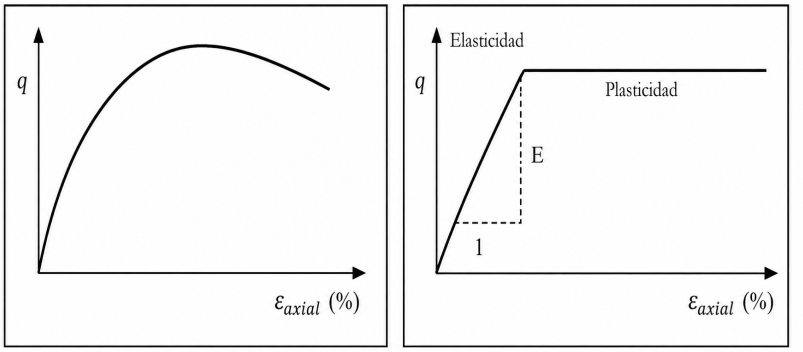
Nota: R. F. Obrzud, 2010

2.2.6.1 Modelo Mohr-Coulomb

El modelo Mohr-Coulomb constituye una aproximación de primer orden para representar el comportamiento no lineal del suelo (Nieto Leal, Camacho Tauta and Ruiz Blanco, 2009). Se trata de un modelo elastoplástico perfecto e isotrópico, cuya formulación combina la ley de elasticidad de Hooke con el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Su aplicación resulta apropiada para una representación simplificada de suelos granulares sueltos y suelos finos normalmente consolidados.

Sin embargo, presenta limitaciones para reproducir la evolución progresiva de las deformaciones plásticas, debido a que considera un comportamiento elástico hasta alcanzar la condición de fluencia y, posteriormente, una respuesta plástica perfecta, tal como se ilustra en la Figura 6. En términos generales, su formulación se fundamenta en dos componentes principales: el comportamiento elástico, que describe las deformaciones recuperables, y el comportamiento plástico, asociado a la generación de deformaciones permanentes o irreversibles.(Nieto Leal et al., 2009)

Figura 6
Respuesta experimental y formulación de modelo elastoplástico perfecto



Nota: Nieto Leal, Camacho Tauta and Ruiz Blanco, 2009

A) Parámetros del modelo Mohr-Coulomb

El modelo Mohr-Coulomb requiere cinco parámetros mecánicos fundamentales para representar la respuesta elastoplástica del suelo:

- **Módulo de elasticidad, E (kPa, MPa):** representa la rigidez del suelo durante la respuesta elástica.
- **Coeficiente de Poisson, ν:** representa la relación entre la deformación transversal y la deformación longitudinal durante la respuesta elástica.
- **Cohesión efectiva, c' (kPa):** representa la componente cohesiva de la resistencia al corte del suelo bajo condiciones expresadas en términos de esfuerzos efectivos.
- **Ángulo de fricción interna efectivo, ϕ':** representa la componente friccional de la resistencia al corte del suelo.
- **Ángulo de dilatancia, ψ:** representa la tendencia del suelo a experimentar cambios de volumen durante el proceso de corte.

Relación elástica — Ley de Hooke generalizada

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)\right] \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)\right] \tag{2.6}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)\right] \tag{2.7}$$

Donde:

- $\varepsilon_{(x,y,z)}$: deformación normales.
- $\sigma_{x,y,z}$: esfuerzo normales.
- E: módulo de elasticidad.
- ν: coeficiente de Poisson.

Criterio de resistencia (modelo Modelo Mohr- Coulomb)

$$\tau = c' + \sigma tan(\phi') \tag{2.8}$$

Donde:

- τ: Esfuerzo cortante
- c': Cohesión efectiva
- σ': Esfuerzo normal efectivo
- ϕ': Ángulo de fricción interna

Componente elástica

El comportamiento elástico del modelo Mohr-Coulomb se describe mediante una relación lineal entre esfuerzos y deformaciones, definida principalmente por el módulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson ν. Durante esta etapa, se asume que las deformaciones son completamente recuperables al retirar las cargas aplicadas y que la rigidez del suelo permanece constante, independientemente del nivel de esfuerzo, siempre que no se supere la superficie de fluencia.

Componente plástica

Cuando el estado tensional del suelo alcanza la superficie de fluencia, se produce la transición del comportamiento elástico al régimen plástico. En el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, esta superficie se encuentra definida por el criterio de resistencia al corte, cuyos parámetros principales son la cohesión efectiva c' y el ángulo de fricción efectivo ϕ'.

Asimismo, la respuesta plástica del suelo está condicionada por el ángulo de dilatancia ψ, que describe la tendencia del material a experimentar variaciones volumétricas

durante el proceso de corte. En conjunto, los parámetros c', ϕ' y ψ, permiten caracterizar la resistencia al corte y el comportamiento volumétrico del suelo una vez superado el límite elástico.

2.2.6.2 Modelo Hardening Soil

A) Fudamentos del modelo

Según Rebolledo, León and Camapum de Carvalho, 2019, el modelo constitutivo Hardening Soil (HS) representa un avance en la modelación del comportamiento mecánico de los suelos, ya que se fundamenta en la teoría de la plasticidad e incorpora una rigidez dependiente del estado tensional. Entre sus principales características destacan las siguientes:

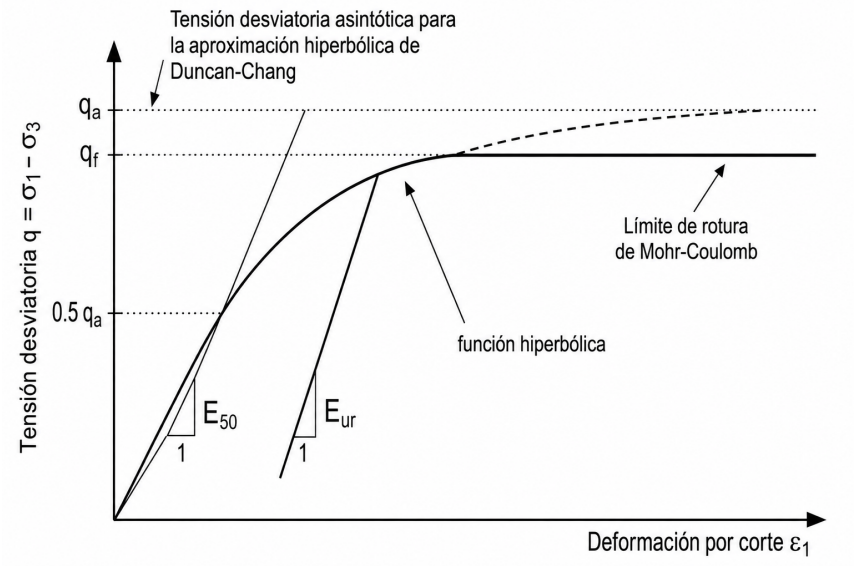
- Las deformaciones totales se determinan mediante una rigidez que varía en función del estado de esfuerzos del suelo.
- La rigidez se define de manera diferenciada para las condiciones de carga y descarga-recarga, permitiendo representar la variación de la respuesta mecánica durante estos procesos.
- Incorpora el endurecimiento por corte (*shear hardening*), mediante el cual se representan las deformaciones plásticas irreversibles generadas por la aplicación de cargas desviadoras primarias.
- Considera el endurecimiento por compresión (*compression hardening*), que permite modelar las deformaciones plásticas permanentes asociadas a la compresión primaria en condiciones edométricas e isotrópicas.
- Adopta una regla de flujo no asociada para el endurecimiento por corte y una regla de flujo asociada para el endurecimiento por compresión.
- Emplea el criterio de falla de Mohr-Coulomb para definir la condición de resistencia al corte del suelo.

B) Curva hiperbólica esfuerzo–deformación

En el modelo HS, la relación tensión - deformación ($q - \varepsilon_1$) debida a la carga primaria es hiperbólica (Duncan and Wright, 2005; Kondner, 1963) para una ensayo triaxial drenado. (figura 7)

Figura 7

Relación hiperbólica tensión - deformación y definición de diferentes módulos en la condición de ensayo triaxial drenado



Nota: R. F. Obrzud, 2010

De donde:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i}\frac{q}{1-\frac{q}{q_a}}, para: q < q_f \tag{2.9}$$

Donde E_i es la rigidez axial relacionada con E_{50} mediante:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2-R_f} \tag{2.10}$$

Donde ε_1 es la deformación axial, q es el esfuerzo desviador y q_a es la asíntota de la resistencia al corte.

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \tag{2.11}$$

Donde R_f es la relación de falla y q_f es el último esfuerzo desviador, que de acuerdo con el criterio de Mohr - Coulomb:

$$q_f = \frac{2sin\phi'}{1-sin\phi'}(\sigma'_3 + c'.cot\phi') \tag{2.12}$$

Donde c' y ϕ' son los parámetros efectivos de resistencia al corte, σ'_3 es la presión de confinamiento del ensayo triaxial y E_{50} es el módulo de rigidez dependiente de la

presión de confinamiento para la carga primaria definido de la siguiente manera:

$$E_{50} = E_{50}^{ref}(\frac{c'.cos\phi' + \sigma_3'.sin\phi'}{c'.cos\phi' + P^{ref}.sin\phi'})^m \tag{2.13}$$

Donde E_{50}^{ref} representa el módulo de rigidez secante de referencia obtenido a partir de un ensayo triaxial drenado, p corresponde a la presión de confinamiento de referencia y m es el exponente que determina la dependencia de la rigidez respecto al estado tensional del suelo, cuyos valores suelen situarse entre 0.3 y 1, dependiendo del tipo de material. Por su parte, el módulo de rigidez para las condiciones de descarga y recarga también depende de la presión de confinamiento. En el modelo Hardening Soil (HS), esta relación se expresa mediante la siguiente formulación:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref}(\frac{c'.cos\phi' + \sigma_3'.sin\phi'}{c'.cos\phi' + P^{ref}.sin\phi'})^m \tag{2.14}$$

Donde E_{ur}^{ref} es el módulo de rigidez de referencia para las condiciones de descarga y recarga.

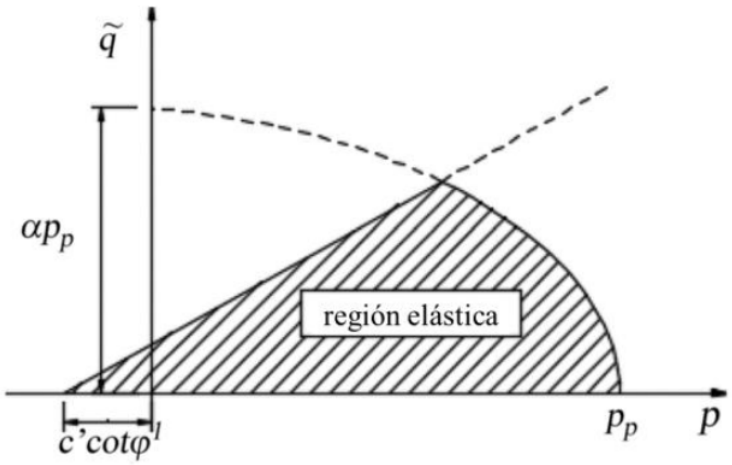
Las deformaciones plásticas volumétricas generadas durante un proceso de compresión isotrópica se determinan a partir de la evolución del estado tensional y del endurecimiento por compresión del suelo, de acuerdo con la formulación constitutiva del modelo Hardening Soil (HS). Su expresión matemática se presenta a continuación:

$$\varepsilon_v^p = \frac{\beta}{1-m}(\frac{p_p}{p^r})^{1-m} \tag{2.15}$$

Donde β es un paramétro auxiliar del modelo relacionado con el módulo de rigidez tangente de referencia para carga edométrica E_{oed}^{ref} (figura 8) de forma similar a los módulos triaxiales edométricos se obtiene de la siguiente manera:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref}(\frac{c'.cos\phi' + \sigma_3'.sin\phi'}{c'.cos\phi' + P^{ref}.sin\phi'})^m \tag{2.16}$$

Figura 8
Curvas de deformación de ensayo edométrico



Nota: Schanz, Vermeer and Bonnier, 1999

C) Mecanismos de endurecimiento

En el modelo de HS, la región elástica está limitada por dos funciones de fluencia (9): la función de fluencia por endurecimiento por corte f_s y la función de fluencia de endurecimiento por compresión de la tapa $\bar{f}$. El primero está definido como:

$$f_s = \bar{f} - \gamma^p \tag{2.17}$$

donde:

$$\bar{f} = \frac{2}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} - \frac{2q}{E_{ur}} \tag{2.18}$$

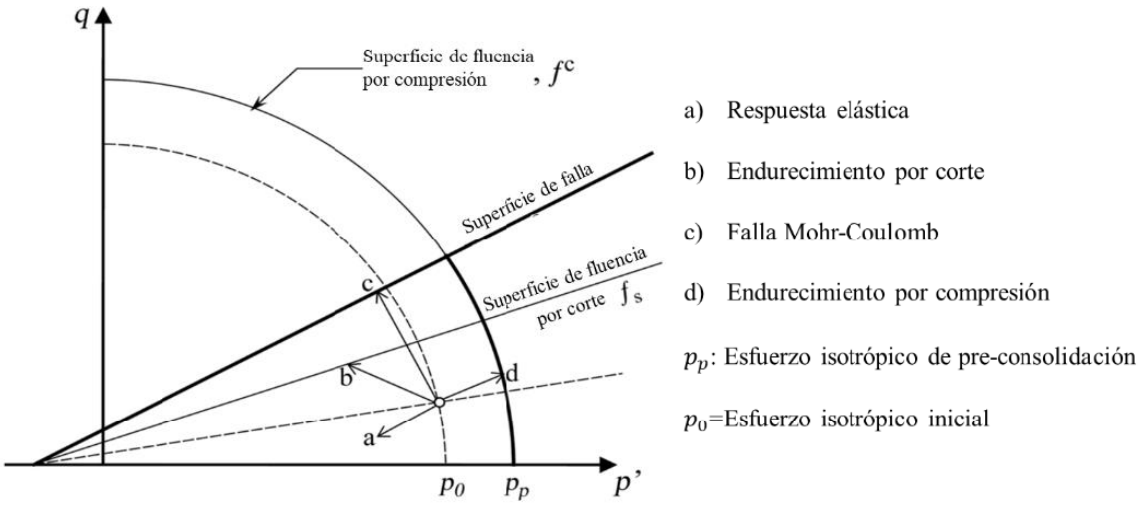
La deformación cortante plástica γ^p está definida como:

$$\gamma^p = 2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p \approx 2\varepsilon_1^p \tag{2.19}$$

Donde ε_1^p es la deformación axial plástica y ε_v^p es la deformación volumétrica plástica. La función de fluencia asociada al endurecimiento por compresión de la tapa se expresa gráficamente en la Figura 9:

Figura 9

Superficie de la región elástica del estado tensional del suelo



Nota: Schanz, Vermeer and Bonnier, 1999

$$f^c = \frac{\tilde{p}^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \tag{2.20}$$

Donde α es un paramétro auxiliar del modelo relacionado con $(K_0^n = 1 - sin\phi')$, es la tensión isotrópica de presconsolidación y $\tilde{p}$ es la media de esfuerzo para tensiones desviatorias.

$$\tilde{q} = \sigma_1' + (\delta - 1)\sigma_2 - \delta\sigma_3' \tag{2.21}$$

Donde:

$$\delta = \frac{3 + sin\phi'}{3 - sin\phi'} \tag{2.22}$$

Para compresión triaxial $(\sigma_2' = \sigma_3')$, $\tilde{q} = \sigma_1' - \sigma_3'$, y para extensión triaxial $(\sigma_1' = \sigma_2')\tilde{q} = \delta(\sigma_1' - \sigma_2')$.

D) Parámetros del modelo

El modelo Hardening Soil establece un total de 11 parámetros los cuales se describen en la siguiente tabla.

Tabla 1

Parámetros que definen el modelo Hardening Soil

Parámetro	Descripción	Unidad	Función
ϕ'	Ángulo de fricción	°	Define la pendiente del crierio de fluencia de Mohr - Coulomb
c'	Cohesión	kPa	Define la intersección de la linea de Morh-Coulomb en la condición de tensión nula
ψ	Ángulo de dilatancia	°	Define la pendiente máxima de la curva $\varepsilon 1 \rightarrow \varepsilon v$ para la dilatancia
E_{ref}^{50}	Modulo de elasticidad secante	kPa	Define la rigidez secante al 50% de la tensión desviadora última q_f con la tensión principal menor de referencia σ_3^{ref}
E_{ref}^{oed}	Modulo tangente en cargas edometricas	kPa	
m	Dependecia de esfuerzo	-	Define la rigidez dependiente de la tensión
E_{ref}^{ur}	Modulo de descarga y recarga	kPa	Define la rigidez de descarga/recarga a deformaciones de ingeniería $(E \approx 10^{-3})$ con la tensión principal menor de referencial σ_3^{ref}
v_{ur}	Relación de poisson	-	define la relación $\varepsilon 3/\varepsilon 1$ en un ciclo de descarga - recarga (deformación elástica)
σ'_{ref}	Tensión de referencia para las rigideces	kPa	La tensión de referencia se utiliza para escalar los módulos de rigidez E_0^{ref}, E_{ur}^{ref}, E_{50}^{ref}, a los valores actuales con respecto a una tensión principal menor actual σ_3.
K_0^{nc}	Coeficiente de presión lateral de tierras	-	
R_f	Relación entre $\frac{q_f}{q_a}$	-	Se utiliza para calcular el parámetro de endurecimieto γ^{PS} mediante el método asintótico. La tensión desviadora q_a define la función hiperbólica f_2 ($R_f = 0.90$ por defecto.)

Nota: Obrzud and Truty, 2018

E) Estado inicial del suelo

El estado inicial de esfuerzos constituye un factor determinante en la respuesta deformacional del suelo. Al respecto, Mella Figueroa, 2022 señala que la representación adecuada de la historia tensional del terreno resulta fundamental para estimar los asentamientos, debido a que las condiciones de consolidación previa influyen

directamente en la rigidez y la compresibilidad del material. Asimismo, Cudny and Truty, 2020 destaca que la consideración del comportamiento del suelo a pequeñas deformaciones, junto con una definición apropiada de los esfuerzos iniciales, permite describir con mayor precisión la evolución de la rigidez durante la aplicación de las cargas. En este contexto, parámetros como la relación de sobreconsolidación (Overconsolidation Ratio, OCR) y la presión de preconsolidación adicional (Pre-Overburden Pressure, POP) desempeñan un papel importante en la definición del estado tensional inicial y en la estimación de los asentamientos mediante el modelo Hardening Soil.

Para suelos normalmente consolidados, la adopción de un valor de OCR igual a uno representa la condición de referencia. Sin embargo, dependiendo de las características del terreno y de las condiciones de carga, esta configuración puede conducir a una estimación excesiva de las deformaciones, particularmente cuando predominan los esfuerzos asociados al peso propio. Por ello, la definición de los parámetros OCR y POP debe fundamentarse en las condiciones geotécnicas del sitio y en la historia tensional del suelo, evitando modificar arbitrariamente sus valores y procurando una representación coherente de su comportamiento inicial.

El OCR se define como:

$$OCR = \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vo}} \tag{2.23}$$

Donde:

- σ'_{vc}: Esfuerzo vertical efectivo de preconsolidación.
- σ'_{vo}: Esfuerzo vertical efectivo actual (geostático)

Interpretación:

- OCR=1 Suelo normalmente consolidado NC.
- OCR>1 Suelo sobreconsolidado OC

Cuanto mayor es el OCR, más rígido y menos compresible es el suelo.

Melnikov, Zazulya, Stepanov, Ashikhmin and Maltseva, 2016, El estudio analiza la influencia de los parámetros OCR y POP en el modelo constitutivo Hardening Soil implementado en PLAXIS, destacando la importancia de una adecuada definición del estado tensional inicial del terreno. Los resultados señalan que el uso del parámetro POP permite representar de manera más realista el comportamiento deformacional

de los suelos sobreconsolidados en comparación con la utilización exclusiva del OCR, según las condiciones analizadas. En este sentido, los autores resaltan que una correcta inicialización de los esfuerzos y de la historia tensional del suelo constituye un aspecto esencial para mejorar la precisión y la confiabilidad de las predicciones obtenidas mediante simulaciones numéricas.

F) Aplicación del modelo en análisis dinámicos

La evolución del modelo Hardening Soil ha permitido ampliar sus aplicaciones en el análisis de problemas geotécnicos sometidos a solicitaciones dinámicas. Según Cudny and Truty, 2020, la incorporación de la rigidez a pequeñas deformaciones posibilita representar la elevada rigidez inicial del suelo y su reducción progresiva a medida que aumenta la amplitud de las deformaciones.

Por otro lado, Yong Deng et al., 2019 demuestra la aplicabilidad del modelo Hardening Soil en simulaciones tridimensionales de estructuras de pavimento sometidas a cargas vehiculares móviles. Los resultados muestran que el modelo permite reproducir la evolución espacial de la cuenca de deflexiones producida por el tránsito, considerando la influencia de la velocidad del vehículo, la variación temporal de las cargas y la respuesta no lineal del suelo.

En contraste con el análisis estático, el análisis dinámico considera que las cargas aplicadas varían en función del tiempo. Por consiguiente, la respuesta del suelo está determinada no solo por la magnitud de las solicitaciones, sino también por su duración, frecuencia y velocidad de aplicación. Bajo estas condiciones, el comportamiento del sistema puede describirse mediante la ecuación general del movimiento, formulada a través del Método de los Elementos Finitos, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(f) \tag{2.24}$$

Donde:

- M: Matriz de masa
- C: Matriz de amortiguamiento
- K: Matriz de rigidez dependiente del estado de esfuerzos
- u: Vector de desplazamientos

Amortiguamiento de Rayleigh

El estudio realizado por Yousheng Deng, Zhao, Li, Yao and Li, 2023 evidencia que los terraplenes presentan un comportamiento distinto cuando están sometidos a cargas dinámicas en comparación con las cargas estáticas. La circulación repetitiva de vehículos provoca variaciones transitorias en los esfuerzos, las deformaciones y las aceleraciones del sistema, cuya respuesta está condicionada por la rigidez del conjunto suelo–terraplén y por la capacidad del material para disipar la energía generada por las cargas móviles. Asimismo, el estudio destaca que la incorporación de mecanismos de amortiguamiento adecuados en los modelos numéricos contribuye a atenuar la amplitud de las vibraciones y a reproducir con mayor precisión la evolución temporal de los desplazamientos y los esfuerzos desarrollados en el terraplén.

Por esta razón, en PLAXIS se incorpora adicionalmente un amortiguamiento viscoso mediante el modelo de Rayleigh, cuya matriz de amortiguamiento está definida por:

$$C = \alpha M + \beta K \tag{2.25}$$

Donde:

- α Coeficiente proporcional a la masa:
- β Coeficiente proporcional a la rigidez.
- C es la matriz de amortiguamiento
- M representa la matriz de masa
- K corresponde a la matriz de rigidez

Los coeficientes α y β se calibran para reproducir el porcentaje de amortiguamiento esperado del suelo, generalmente comprendido entre 2 % y 5 % en materiales granulares compactados.

G) Limitaciones del modelo

El modelo Hardening Soil presenta ventajas importante, pero también restricciones claras. R. F. Obrzud, 2010

- Presenta limitaciones para representar adecuadamente el ablandamiento asociado a la dilatancia y los procesos de degradación de la estructura del suelo.
- No reproduce de manera completa la respuesta histerética real que se desarrolla durante ciclos repetidos de carga y descarga.

- Tiene limitaciones para describir la plasticidad cíclica y la acumulación progresiva de deformaciones permanentes como consecuencia de la aplicación reiterada de cargas de tráfico.
- La precisión de sus resultados depende significativamente de la calibración de los parámetros constitutivos. Por ello, la ausencia de ensayos de laboratorio, como pruebas triaxiales, edométricas y de descarga-recarga, puede incrementar la incertidumbre en las predicciones numéricas.
- En análisis dinámicos, el modelo Hardening Soil (HS) convencional puede resultar insuficiente para representar determinados fenómenos. En estos casos, puede recurrirse al modelo HSsmall, que incorpora la dependencia de la rigidez con el nivel de deformación; sin embargo, también presenta limitaciones para reproducir la degradación cíclica del suelo y los fenómenos de licuefacción.

H) Justificación del uso del modelo Hardening Soil en la presente investigación

La implementación del modelo constitutivo Hardening Soil (HS) en simulaciones tridimensionales bajo la acción de cargas móviles permite representar de manera satisfactoria la evolución de la cuenca de deflexiones, la distribución de esfuerzos y los asentamientos inducidos por el tránsito vehicular. Asimismo, sus resultados presentan una mayor representatividad del comportamiento del suelo en comparación con los obtenidos mediante modelos que consideran una rigidez constante. En este sentido, el modelo HS constituye una alternativa adecuada para el análisis numérico de la interacción entre las cargas móviles y las estructuras de pavimento o los rellenos de suelo. (Yong Deng et al., 2019)

2.2.7 Cargas vehiculares y solicitaciones dinámicas

Las cargas vehiculares que actúan sobre estructuras geotécnicas, como los terraplenes, presentan una variación temporal en función del movimiento de los vehículos, desde su aproximación hasta su paso y posterior alejamiento del punto de análisis. Debido a esta variabilidad, se consideran cargas dinámicas transitorias, puesto que su magnitud y efecto sobre el suelo evolucionan a lo largo del tiempo, generando una respuesta mecánica dependiente de la posición y el desplazamiento de la carga.

Investigaciones en mecánica de suelos como las de Braja M. Das, 2010, indica que la

correcta representación temporal de la carga influyen significativamente en la predicción de las deformaciones.

2.2.7.1 Clasificación de cargas vehiculares

Las cargas vehiculares representan la principal fuente de solicitación en las carreteras. Estas cargas pueden clasificarse en:

A) Cargas Estáticas

Son las cargas transmitidas por el peso propio del vehículo cuando se encuentra en reposo.

B) Cargas Dinámicas

Se producen como consecuencia del desplazamiento de los vehículos sobre la superficie del terreno, lo que ocasiona cambios continuos en la posición de aplicación de la carga y en la respuesta dinámica del suelo. Entre los principales factores que influyen en el comportamiento del sistema frente a estas solicitaciones se encuentran los siguientes:

- Velocidad de circulación del vehículo.
- Magnitud y distribución de las cargas por eje.
- Separación entre ejes.
- Interacción vehículo–pavimento–suelo.
- Propiedades dinámicas del suelo (rigidez, amortiguamiento y estado inicial de esfuerzos).
- Vibraciones inducidas por el tránsito y las irregularidades superficiales.

De acuerdo con Yong Deng et al., 2019 y Cudny and Truty, 2020, la incorporación de estos factores en el análisis numérico, junto con el empleo de un modelo constitutivo capaz de representar la dependencia de la rigidez del suelo respecto al nivel de deformación, contribuye a mejorar la precisión de las predicciones de los desplazamientos y asentamientos inducidos por las cargas vehiculares.

2.2.8 Métodos numéricos en ingeniería geotécnica

La modelación numérica representa una herramienta esencial en el estudio de problemas geotécnicos, debido a que permite reproducir y evaluar la respuesta del suelo ante diferentes condiciones de carga, configuración geométrica y propiedades

mecánicas. Asimismo, el desarrollo de los métodos numéricos ha facilitado el análisis de fenómenos complejos que presentan limitaciones para su resolución mediante procedimientos analíticos convencionales, proporcionando una aproximación más detallada del comportamiento del terreno. (Zienkiewicz, Taylor and Zhu, 2013)

Entre los métodos numéricos más utilizados en geotecnia se encuentran:

- Método de los elementos finitos (FEM)
- Método de diferencias finitas.
- Método de elementos de contorno.

De estos el más ampliamente utilizado es el Método de elementos finitos, debido a su capacidad para representar geometrías complejas y comportamiento no lineales del suelo. (Zienkiewicz et al., 2013)

2.2.8.1 Método de los elementos finitos (FEM)

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es una técnica numérica ampliamente utilizada para analizar el comportamiento de medios continuos mediante la discretización del dominio en un número finito de elementos interconectados por nodos. Cada elemento se analiza a partir de sus propiedades y relaciones constitutivas, y posteriormente se integran sus contribuciones para obtener una solución global del problema. Cuando se aplican cargas externas sobre el dominio discretizado, se generan deformaciones en los elementos y desplazamientos en sus nodos. La formulación del MEF puede fundamentarse en el principio de mínima energía potencial, a partir del cual se establece un sistema de ecuaciones cuya resolución permite determinar los desplazamientos nodales y, a partir de ellos, calcular las deformaciones y los esfuerzos en el medio analizado.

Diversos estudios respaldan la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) en el análisis de problemas geotécnicos. En este contexto, Figueredo Sosa, Cobelo Cristiá and Fernández Lorenzo, 2014 señala que la modelación tridimensional mediante elementos finitos permite evaluar de manera confiable la interacción entre el suelo y la estructura, así como la distribución espacial de los esfuerzos y asentamientos en cimentaciones de geometría compleja. Asimismo, los resultados destacan que los modelos tridimensionales pueden proporcionar predicciones más precisas que las obtenidas mediante aproximaciones bidimensionales simplificadas,

especialmente cuando las condiciones geométricas y mecánicas del problema requieren una representación espacial más completa.

Por su parte, DelaCruz, 2023 señala que la aplicación del Método de los Elementos Finitos mediante el software PLAXIS 3D permite analizar de manera integral la respuesta mecánica del suelo bajo distintas condiciones de saturación, estados tensionales y etapas constructivas. En este sentido, dicha herramienta numérica ofrece flexibilidad para representar las condiciones del terreno y los procesos de construcción, facilitando el estudio de problemas geotécnicos que presentan un alto nivel de complejidad.

Según Zienkiewicz et al., 2013, el procedimiento general del FEM comprende las siguientes etapas:

- Discretización del dominio.
- Definición de propiedades del material.
- Aplicación de condiciones de borde.
- Aplicación de cargas.
- Resolución de sistema de ecuaciones.

Principio Básico

El método de elemenos finitos discretiza el dominio continuo del suelo en elementos finitos (tetraedos en 3D), donde las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del suelo se resuelven numéricamente en puntos discretos (nodos):

Ecuación de equilibrio:

$$[K]\{\mu\} = \{F\} \tag{2.26}$$

Donde:

1. $[K]$: Matriz de rigidez global
2. $\{\mu\}$: Vector de desplazamientos nodales
3. $\{F\}$: Vector de fuerzas nodales.

2.2.9 Plaxis 3D

PLAXIS 3D es un software especializado en el análisis geotécnico tridimensional que emplea el Método de los Elementos Finitos (MEF) para simular el comportamiento del

suelo bajo diferentes condiciones. Esta herramienta permite evaluar las deformaciones del terreno, la estabilidad de las estructuras geotécnicas y el flujo de agua subterránea, entre otros fenómenos relevantes para la ingeniería geotécnica. Asimismo, forma parte de la familia de programas PLAXIS, ampliamente utilizados en el ámbito internacional para la modelación numérica, el análisis y el diseño de proyectos geotécnicos que requieren una representación detallada de las condiciones del terreno y de su interacción con las estructuras. (Brinkgreve, 2016)

Laera, Bui and Brasile, 2023, Se desarrolló e implementó una versión modificada del modelo constitutivo Barcelona Basic Model (BBM) como un modelo definido por el usuario (UDSM) en el software PLAXIS, con el propósito de representar el comportamiento mecánico de los suelos no saturados. Los resultados demostraron que el modelo permite reproducir satisfactoriamente la relación esfuerzo–deformación, tanto en ensayos de laboratorio como en aplicaciones geotécnicas a escala de ingeniería. Estos hallazgos ponen de manifiesto la versatilidad del Método de los Elementos Finitos para integrar modelos constitutivos avanzados en la simulación numérica, adaptando el análisis a las propiedades y condiciones específicas del terreno.

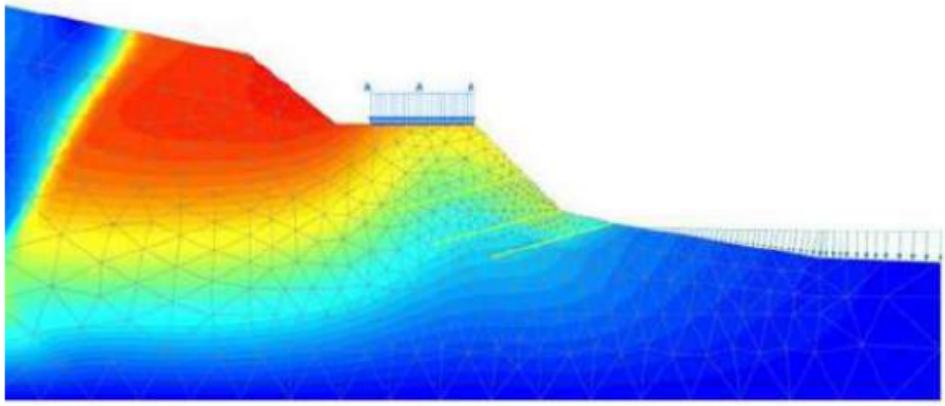
Plaxis usa elementos de 10 nodos (tetraédico de orden superior) proporciona mayor precisión en la representación de deformaciones y tensiones. Delft Plaxis, 2004

Este programa permite:

- Modelar geometrías complejas.
- Simular etapas constructivas.
- Aplicar diferentes modelos constitutivos del suelo.
- Analizar deformaciones y esfuerzos.

Estas capacidades lo convierten en una herramienta fundamental para el análisis de rellenos estruturales sometidos a cargas vehiculares.

Figura 10
Esquema grafico de elementos finitos



Nota: Adoptado de (Bentley Systems, Incorpporated, 2023)

2.2.9.1 Soil Test de PLAXIS

Delft Plaxis, 2004

Asimismo, esta herramienta permite calibrar los parámetros constitutivos del modelo con el fin de lograr una mayor correspondencia entre los resultados obtenidos experimentalmente en laboratorio y las predicciones numéricas. Además, la funcionalidad SoilTest admite la evaluación de diferentes modelos constitutivos, incluidos tanto los modelos de suelo incorporados de forma predeterminada en el software como aquellos desarrollados e implementados por el usuario. (der Sloot M, 2018)

Las principales funciones son:

Tabla 2

Funciones principales del SoilTest de PLAXIS

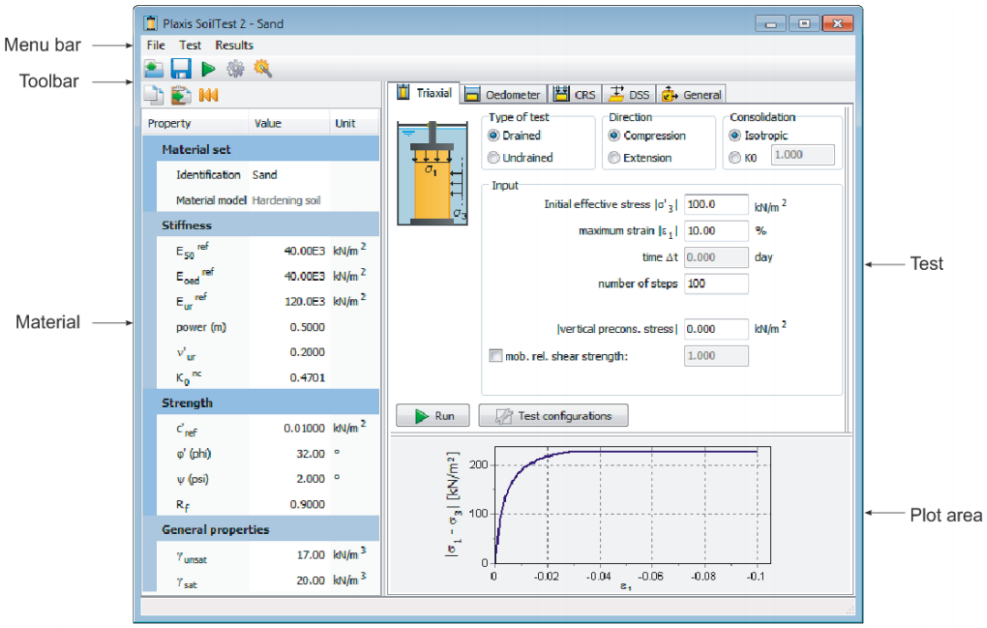
Función	Descripción
Comparación de comportamiento	Comparar el comportamiento definido por el modelo constitutivo con datos experimentales de investigación de sitio
Optimización de parámetros	Optimizar parámetros del modelo para obtener el mejor ajuste entre resultados del modelo y datos de laboratorio.
Validación de calibración	Verificar la calibración de modelos constitutivos antes de su uso en análisis geotécnicos.
Compatibilidad universal	Funciona con cualquier modelo tanto estándar como definidos por el usurario.

Nota: der Sloot M, 2018

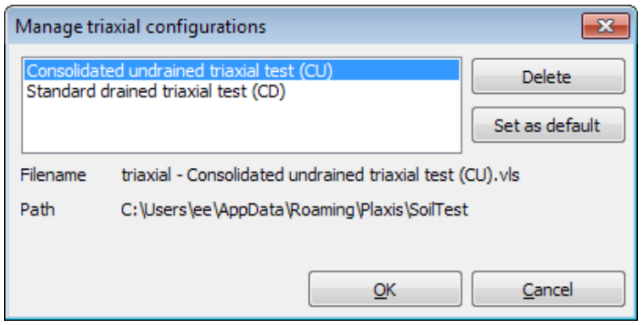
SoilTest permite configurar y ejecutar diversos ensayos de laboratorio virtuales como:

- Ensayo triaxial (consolidado-drenado, CD; consolidado-no drenado, CU).
- Ensayo edométrico (consolidación unidimensional).
- Ensayo general personalizado con condiciones de esfuerzo/deformación arbitrarias.

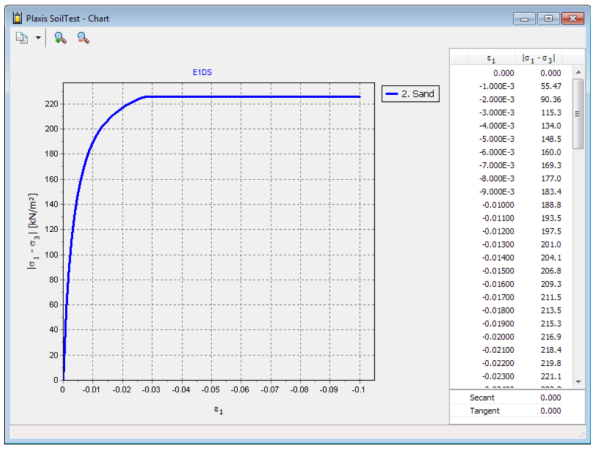
Figura 11
Simulación de un ensayo triaxial en SoilTest



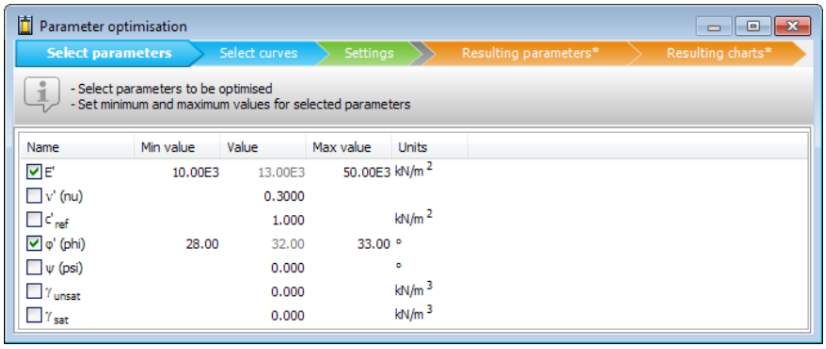
(a) *Interfaz general del software*



(b) *Configuración del ensayo triaxial*



(c) *Resultados del ensayo virtual (curva esfuerzo-deformación)*



(d) *Optimización de parámetros para la calibración del modelo*

Nota: der Sloot M, 2018

La calibración de modelos constitutivos mediante SoilTest sigue esta metodología.

- Obtención de parámetros básicos de ensayos de laboratorio (triaxial, edométrico, límites de Atterberg)
- Creación del material en PLAXIS Input con los parámetros inciales.
- Ejecución de SoilTest con el tipo de ensayo correspondiente.
- Comparación d curvas esfuerzo - deformación simuladas vs experimentales.
- Optimización iterativa de parámetros hasta lograr mejor ajuste.

2.2.10 Análisis de sensibilidad

Para analizar la influencia de los parámetros del suelo en las deformaciones del relleno estructural, se realizó un análisis de sensibilidad siguiendo lo propuesto por Phoon and Kulhawy, 1999 quienes sugieren rangos de variabilidad de hasta un 70% para módulo de rigidez y un 50% para la cohesión.

El análisis de sensibilidad permite determinar que tan sensible es el asentamiento con respecto a los parámetros de análisis, es decir determina que parámetros influyen en menor y mayor proporción con respecto al asentamiento.

Un análisis de sensibilidad se puede describir de la siguiente manera:

- Se necesita considerar el valor mínimo y máximo de los parámetros que se están utilizando en el análisis.
- Cada parámetro, el cual se muestra en el eje horizontal, cambia de manera incremental y constante, dentro del rango definido entra máximo y mínimo, y el asentamiento por su lado varía con respecto al parámetro que se está analizando.

- Lo mencionado previamente, desencadena la gráfica de asentamiento máximo vs parámetros y posibilita presenciar que tan sensible es el asentamiento con respecto a un determinado parámetro.
- Una recta con una pendiente muy marcada significa que el asentamiento se ve influenciado en gran medida por el parámetros con el cual se está analizando.
- Una recta horizontal significa que el asentamiento no se ve influenciado por el parámetro con el cual se está analizando.

2.2.11 Ensayo con Deflectómetro de impacto ligero (LWD)

El Deflectómetro de impacto Liviano (LWD) es un equipo de impacto portátil, que fue creado para realizar mediciones in-situ de módulos elásticos de bases, subbases y subrasantes, Osorio, 2008. Este dispositivo está conformado de tres partes principales: (a) una base con una placa de carga, sensores y equipos electrónicos, (b) incluye el sistema de adquisición de datos, el neopreno o amortiguador de caucho y la barra guía y (c) los aplicativos de procesamiento de la información, (Umashankar, Hariprasad and Kumar, 2016). La profundidad de influencia es de hasta 300 mm dependiendo de la rigidez de los materiales a ensayar.

En los últimos años, el uso del deflectómetro de impacto liviano (LWD) ha adquirido mayor relevancia en el ámbito de la ingeniería vial, debido a su aplicación en el control de calidad durante la construcción de estructuras de pavimento y en la evaluación de materiales empleados en la construcción de carreteras. Según Umashankar et al., 2016, la incorporación de esta tecnología representa una alternativa para la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, particularmente en la determinación del módulo de deformación de las capas granulares. De esta manera, el LWD contribuye al desarrollo de procedimientos de evaluación basados en la respuesta mecánica del material ante cargas de impacto, complementando los métodos convencionales de control de compactación fundamentados en la densidad seca y facilitando una valoración más directa de la capacidad de soporte de las capas del pavimento.

Figura 12

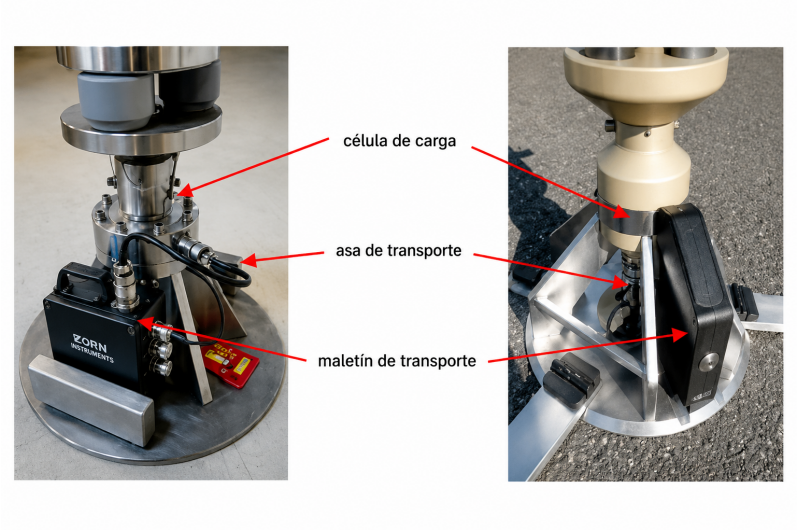
Fotografía tomada en durante los estudio de campo



Nota: Elaboración propia

Figura 13

Partes del equipo LWD



Nota: Elaboración propia

La revisión realizada por Paul R. Fleming, Frost and Lambert, 2007 señala que el LWD se ha convertido en uno de los métodos más utilizados para la evaluación rutinaria de la rigidez de materiales de pavimentos, debido a que proporciona resultados inmediatos, reduce los tiempos de inspección y presenta una adecuada correlación con otros ensayos empleados para determinar el módulo de deformación del suelo.

2.2.12 Calibración y validación de modelos numéricos

La calibración implica el establecimiento y modificación de los parámetros geotécnicos del modelo constitutivo basándose en datos obtenidos de pruebas de laboratorio, ensayos en el sitio o resultados experimentales. La meta es que la respuesta numérica refleje, con la máxima precisión posible, el comportamiento esfuerzo-deformación del material, asegurando que elementos tales como el módulo de deformación, la rigidez de descarga y recarga, la resistencia al corte y la historia de cargas sean representativos del terreno analizado. (Schanz, Vermeer and Bonnier, 2019)

La comprobación del modelo necesita ser respaldada por un estudio estadístico que mida el nivel de coincidencia entre los datos experimentales y las simulaciones computacionales. Con este propósito, se suelen utilizar métricas como el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), que facilitan una evaluación objetiva de la exactitud y potencial predictivo del modelo. En este contexto, Nour, Slimani and Laouami, 2002 resalta que el uso de indicadores estadísticos proporciona una evaluación más robusta de la confiabilidad de los modelos numéricos empleados en la predicción de asentamientos.

Podolsky et al., 2017 evidencia que las deformaciones medidas en el terreno sirven como un estándar fiable para calibrar y validar los modelos generados a través del Método de Elementos Finitos. Indica que una buena coincidencia entre las reacciones observadas en experimentos y las predicciones de los modelos numéricos, concluyendo que la combinación de pruebas en el campo y la simulación numérica refuerza la seguridad en la evaluación de tensiones, deformaciones y hundimientos provocados por el tráfico vehicular.

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Relleno estructural

Es el recurso elegido que se ubica y compacta de manera precisa para dar forma a componentes de la infraestructura vial como terraplenes, aceras y entradas a puentes, así como rellenos en muros de contención. Su objetivo es ofrecer solidez estructural,

repartir de manera adecuada las cargas que provienen del tráfico y reducir la aparición de deformaciones y hundimientos a lo largo de la vida de la infraestructura.

2.3.2 Deformación

La alteración se refiere a la modificación en la forma o medida que sufre un material al estar expuesto a fuerzas externas. En el ámbito de la ingeniería geotécnica, las deformaciones indican cómo reacciona el terreno ante las exigencias provocadas por cargas de tipo estático o dinámico.

En este estudio, la deformación se representa a través de los movimientos verticales que se obtienen utilizando el método de los elementos finitos y que han sido comprobados a través del ensayo LWD.

2.3.3 Asentamiento

El hundimiento se refiere al movimiento vertical hacia abajo que ocurre por la alteración del terreno a causa de la imposición de cargas. Esto puede suceder de forma instantánea tras la carga o ir avanzando gradualmente con el tiempo por proceso de consolidación. En estructuras de relleno, los hundimientos excesivos pueden causar interrupciones en el funcionamiento de la infraestructura, la aparición de grietas en el pavimento y perjuicios en los muros de contención.

2.3.4 Solicitación dinámica

Las cargas dinámicas se refieren a fuerzas cuya intensidad varía a lo largo del tiempo y ocasionan cambios en las aceleraciones, vibraciones y deformaciones en el terreno.

En las vías, estas fuerzas son provocadas fundamentalmente por el movimiento de automóviles, cuyos ejes emiten cargas móviles que alteran de manera constante el estado de tensión del suelo.

2.3.5 carga vehicular

Es el conjunto de fuerzas transmitidas por las ruedas del vehículo hacia el pavimento y posteriormente al terreno de fundación.

Su magnitud depende de factores como:

- Peso del vehículo.

- Configuración de ejes.
- Sepración entre eje.
- Velocidad de circulación.

2.3.6 Método de elementos finitos (FEM)

El enfoque de los elementos discretos es una técnica matemática que facilita la solución de dificultades complicadas al dividir el área continua en diminutos componentes conectados entre sí.

Su aplicación permite estimar:

- Desplazamientos
- Deformaciones
- Esfuerzos
- Comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de carga.

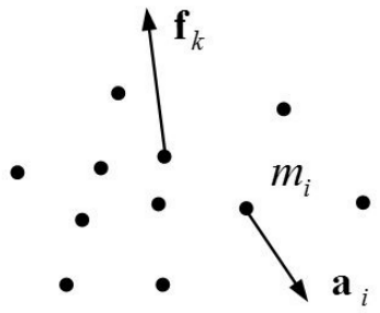
2.3.6.1 Formulación matemática y procedimiento numérico del modelo de elementos finitos

El fenómeno que se examina se refiere a la alteración de un material geotécnico expuesto a fuerzas cambiantes a lo largo del tiempo, las cuales pueden ser causadas por vehículos en movimiento o por una vibración dinámica, dependiendo del caso analizado. Desde la perspectiva de la mecánica de medios continuos, el comportamiento del material se define a través de las ecuaciones que rigen la conservación del movimiento y las conexiones cinemáticas entre variaciones y deformaciones.

A) Formulación matemática del fenómeno físico

La ecuación de movimiento se establece a partir del principio de balance de cantidad de movimiento lineal, derivado de la segunda ley de Newton aplicada a un volumen material. Al incorporar el teorema de Cauchy para las tensiones y aplicar el teorema de la divergencia, se obtiene la forma diferencial local del balance de cantidad de movimiento. En consecuencia, para un medio continuo sometido a fuerzas de cuerpo. Consideremos un sistema discreto compuesto por n partículas, de modo que la partícula i tiene una masa m_i, una aceleración a_i y está sometida a una fuerza f_i. (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

Figura 14
Sistema de puntos discretos



Nota:Oliver and Agelet de Saracibar, 2017

$$f_i = m_i a_i = m_i \frac{dv_i}{dt} = \frac{d}{dt}(m_i v_i) \tag{2.27}$$

Donde:

- f_i: fuerza resultante sobre la partícula i, en N.
- m_i: masa de la partícula, en kg.
- a_i: aceleración de la partícula, en m/s^2.
- v_i: velocidad de la partícula, en m/s.
- $m_i v_i$: momento lineal de la partícula, en kg·m/s.

La ecuación parte de la segunda ley de Newton:

$$f_i = m_i a_i \tag{2.28}$$

Como la aceleración es la derivada temporal de la velocidad,

$$a_i = \frac{dv_i}{dt} \tag{2.29}$$

y si la masa permanece constante, se obtiene:

$$f_i = \frac{d}{dt}(m_i v_i) \tag{2.30}$$

Momento lineal: Se define como

$$p_i = m_i v_i \tag{2.31}$$

El momento lineal es una magnitud vectorial. Depende tanto de la masa como de la velocidad y tiene la misma dirección que esta última.

No debe confundirse con la energía cinética:

$$E_c = \frac{1}{2} m_i v_i^2 \tag{2.32}$$

El momento lineal es proporcional a la velocidad, mientras que la energía cinética depende del cuadrado de su magnitud.

Balance para un conjunto de partículas

Aplicando ahora la segunda ley de Newton al sistema discreto formado por n partículas, se obtiene: (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} f_i = \frac{d}{dt}\left(\sum_{i=1}^{n} m_i v_i\right) = \frac{dP(t)}{dt} \tag{2.33}$$

Donde:

- n: número de partículas del sistema.
- $R(t)$: resultante de todas las fuerzas que actúan sobre el sistema.
- $P(t)$: momento lineal total del sistema.

El momento lineal total se define como:

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n} m_i v_i \tag{2.34}$$

La idea consiste en aplicar la segunda ley de Newton a cada partícula y sumar las ecuaciones:

$$\sum_{i=1}^{n} f_i = \sum_{i=1}^{n} m_i a_i \tag{2.35}$$

Si las masas son constantes, podemos escribir:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i \frac{dv_i}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\sum_{i=1}^{n} m_i v_i\right) \tag{2.36}$$

Por tanto:

$$R(t) = \frac{dP(t)}{dt} \tag{2.37}$$

La resultante de las fuerzas externas que actúan sobre el sistema determina cómo cambia su momento lineal total.

En un sistema de partículas, las fuerzas internas de interacción se cancelan por pares cuando se cumplen las condiciones habituales de la tercera ley de Newton y se consideran las fuerzas de acción y reacción. (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

Caso particular: equilibrio

$$R(t) = 0 \quad \Longrightarrow \quad \frac{dP(t)}{dt} = 0 \tag{2.38}$$

Integrando respecto del tiempo:

$$P(t) = constante \tag{2.39}$$

Esto significa que el momento lineal total se conserva. Una fuerza resultante nula no significa necesariamente que el cuerpo esté en reposo; también puede desplazarse con velocidad constante.

Momento lineal de un medio continuo

- Generalización a la mecánica del medio continuo

  En un medio continuo, como el suelo o el concreto, no se estudia cada partícula por separado. En su lugar, se considera que la masa está distribuida continuamente en una región del espacio. Esto permite reemplazar la suma de las masas y velocidades de las partículas por una integral sobre el volumen del material. (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

$$P(t) = \int_{\mathscr{M}} v\, dM = \int_{V_t} \rho v\, dV \tag{2.40}$$

  Donde:

  - $\mathscr{M}$: conjunto material considerado.
  - V_t: volumen ocupado por el material en el instante t.

- dM: elemento infinitesimal de masa.
- ρ: densidad de masa, en kg/m^3.
- v: campo de velocidades, en m/s.
- dV: elemento infinitesimal de volumen, en m^3.

La relación entre masa y densidad es:

$$dM = \rho \, dV \tag{2.41}$$

Sustituyendo:

$$P(t) = \int_{V_t} \rho v \, dV \tag{2.42}$$

- Resultante de las fuerzas sobre un volumen material

  La resultante de las fuerzas que actúan sobre el continuo está formada por las fuerzas de cuerpo y las fuerzas superficiales.

$$R(t) = \int_V \rho b \, dV + \int_{\partial V} t \, dS \tag{2.43}$$

En esta ecuación, ∂V representa la superficie que delimita el volumen V.

Fuerzas de cuerpo

$$F_b = \int_V \rho b \, dV \tag{2.44}$$

Son fuerzas que actúan sobre la masa distribuida en el volumen, como la gravedad y otras fuerzas volumétricas. (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

- b: fuerza de cuerpo por unidad de masa.
- ρb: fuerza de cuerpo por unidad de volumen.

Para la gravedad, $b = g$.

Fuerzas superficiales

$$F_s = \int_{\partial V} t \, dS \tag{2.45}$$

Son fuerzas transmitidas a través de la superficie del volumen, por ejemplo, las presiones de contacto, las cargas aplicadas y las acciones del material circundante. (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

- t: vector de tracción, en $\mathrm{N/m^2}$ o Pa.
- dS: elemento infinitesimal de superficie, en $\mathrm{m^2}$.

La tracción depende del estado de esfuerzos y de la orientación de la superficie.

Relación entre la tracción y los esfuerzos

La relación de Cauchy es:

$$t = \sigma n \tag{2.46}$$

Donde σ es el tensor de esfuerzos de Cauchy y n es el vector unitario normal a la superficie.

En componentes cartesianas tridimensionales:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \tag{2.47}$$

El tensor contiene esfuerzos normales y cortantes. Por ello, las fuerzas superficiales no necesariamente actúan perpendicularmente a la superficie.

- Forma integral del balance del momento lineal

  La forma integral del balance del momento lineal se expresa como: (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

$$\int_V \rho b \, dV + \int_{\partial V} t \, dS = \frac{d}{dt} \int_{V_t} \rho v \, dV \tag{2.48}$$

La ecuación expresa la segunda ley de Newton para un medio continuo. La suma de las fuerzas de cuerpo y superficiales es igual a la variación temporal del momento lineal total.

En condiciones dinámicas, la velocidad y la aceleración varían con el tiempo, por lo que la resultante de las fuerzas no tiene por qué ser cero.

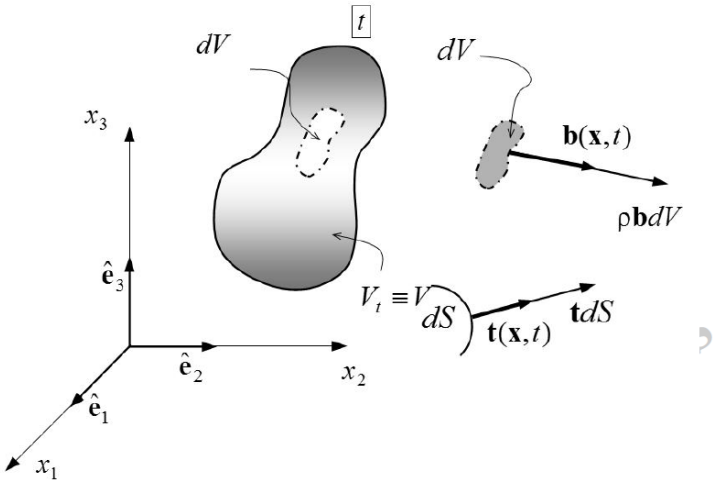
Para un volumen material de masa constante, también se puede expresar como:

$$F_{\text{ext}} = \int_{V_t} \rho a \, dV \tag{2.49}$$

Si el cuerpo se traslada como un conjunto con aceleración uniforme, se obtiene:

$$F_{\text{ext}} = Ma \tag{2.50}$$

Figura 15
Fuerzas que actúan sobre un volumen material del medio continuo.



Nota:Oliver and Agelet de Saracibar, 2017

- Forma local del balance del momento lineal

  La relación de Cauchy establece que:

$$t = \sigma n \tag{2.51}$$

  Por tanto:

$$\int_{\partial V} t \, dS = \int_{\partial V} \sigma n \, dS \tag{2.52}$$

Mediante el teorema de la divergencia:

$$\int_{\partial V} \sigma n \, dS = \int_{V} \nabla \cdot \sigma \, dV \tag{2.53}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 2.48 :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_t} \rho v \, dV = \int_{V} \rho b \, dV + \int_{V} \nabla \cdot \sigma \, dV \tag{2.54}$$

Considerando la conservación de la masa para un volumen material, se obtiene:

$$\int_{V} \rho a \, dV = \int_{V} \rho b \, dV + \int_{V} \nabla \cdot \sigma \, dV \tag{2.55}$$

Agrupando los términos:

$$\int_{V} (\nabla \cdot \sigma + \rho b - \rho a) \, dV = 0 \tag{2.56}$$

Como el volumen de integración es arbitrario, la forma local del balance del momento lineal queda expresada como:

$$\nabla \cdot \sigma + \rho b = \rho a \tag{2.57}$$

Esta expresión se conoce como ecuación de Cauchy del movimiento. Establece que la resultante de las fuerzas asociadas al campo de esfuerzos y de las fuerzas de cuerpo es igual a la fuerza inercial por unidad de volumen. (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

En condiciones estáticas, la aceleración es nula y se obtiene:

$$\nabla \cdot \sigma + \rho b = 0 \tag{2.58}$$

En condiciones dinámicas, el término de aceleración debe mantenerse para representar los efectos inerciales asociados a las cargas variables en el tiempo.

Este principio constituye la base de la formulación del movimiento en los análisis numéricos mediante elementos finitos, en los que se combina con las relaciones

constitutivas del material y las condiciones de contorno para determinar la distribución de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos.

B) Formulación numérica mediante el método de elementos finitos

Antes de formular la ecuación semidiscreta del movimiento, se describe el procedimiento mediante el cual se obtienen las matrices globales del método de elementos finitos (MEF).

1. **Principio de trabajos virtuales o método de residuos ponderados/Galerkin**

   La formulación débil de la ecuación de equilibrio dinámico se deriva del principio de trabajos virtuales y de la integración por partes, lo que facilita expresar el equilibrio del continuo en términos de integrales. Esta formulación es fundamental para la discretización espacial del problema a través del método de elementos finitos.

   La ecuación de equilibrio dinámico en su forma diferencial se define como: (Oliver and Agelet de Saracibar, 2017)

$$\nabla \cdot \sigma + b = \rho \ddot{u} \tag{2.59}$$

   Es la expresión tridimensional del principio de trabajos virtuales. (Zienkiewicz and Taylor, 2000)

$$\int_{\Omega} \delta\varepsilon^T \sigma \, d\Omega - \int_{\Omega} \delta u^T b \, d\Omega - \int_{\Gamma} \delta u^T t \, d\Gamma = 0 \tag{2.60}$$

   Al incorporar la inercia en el equilibrio dinámico. Si b representa las fuerzas de volumen externas, la fuerza de volumen efectiva puede escribirse como:

$$b_{ef} = b - \rho \ddot{u} \tag{2.61}$$

   Al sustituir esta expresión en la formulación de trabajos virtuales y reorganizar los términos, se obtiene la ecuación dinámica.

2. **Integración por partes o teorema de la divergencia**

Aplicando el teorema de la divergencia e integrando por partes, se obtiene la formulación débil del problema dinámico. (Hughes, 2000)

$$\int_{\Omega} \rho\, \delta u^T \ddot{u}\, d\Omega + \int_{\Omega} \delta\varepsilon^T \sigma\, d\Omega = \int_{\Omega} \delta u^T b\, d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta u^T t\, d\Gamma \tag{2.62}$$

donde $\delta\varepsilon$ representa el vector de deformaciones virtuales y t es el vector de tracciones prescritas sobre la frontera Γ_t.

3. **Discretización espacial y matrices elementales**

El campo de desplazamientos se aproxima mediante las funciones de forma del elemento: (Hughes, 2000)

$$u = Nd \tag{2.63}$$

La relación entre deformaciones y desplazamientos se expresa como:

$$\varepsilon = Bd, \qquad B = LN \tag{2.64}$$

donde N es la matriz de funciones de forma, L es el operador diferencial y d es el vector de desplazamientos nodales.

El área de desplazamientos se contempla utilizando funciones de forma vinculadas a las libertades nodales. Con base en esta consideración, las deformaciones se describen a partir de los desplazamientos nodales a través de la matriz de deformación-desplazamiento, según el enfoque tradicional del método de elementos finitos.

Matriz de masa elemental

$$M^e = \int_{\Omega_e} \rho N^T N\, d\Omega \tag{2.65}$$

Vector de fuerzas internas elemental

$$f^e_{\text{int}} = \int_{\Omega_e} B^T \sigma\, d\Omega \tag{2.66}$$

Vector de fuerzas externas elemental

$$f^e_{\text{ext}} = \int_{\Omega_e} N^T b \, d\Omega + \int_{\Gamma^e_t} N^T t \, d\Gamma \tag{2.67}$$

4. **Ensamblaje global**

Las matrices y los vectores globales se obtienen mediante la contribución de todos los elementos, utilizando las relaciones de conectividad nodal. De forma general:

$$M = \sum_{e=1}^{N_{elem}} A_e^T M^e A_e \tag{2.68}$$

$$f_{int} = \sum_{e=1}^{N_{elem}} A_e^T f^e_{int} \tag{2.69}$$

$$f_{ext} = \sum_{e=1}^{N_{elem}} A_e^T f^e_{ext} \tag{2.70}$$

donde A_e representa el operador de ensamblaje o conectividad del elemento e y N_{elem} es el número total de elementos finitos.

Una vez realizado el ensamblaje global, la ecuación semidiscreta del movimiento se expresa como: (K. Brinkgreve and Swolfs, 2018)

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + f_{int}(d) = f_{ext}(t) \tag{2.71}$$

Para un comportamiento elástico lineal, $f_{int} = Kd$, por lo que la ecuación anterior adopta la forma:

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + Kd = f_{ext}(t) \tag{2.72}$$

Procedimiento de integración temporal

La integración en el tiempo facilita la obtención del desarrollo de los movimientos, tasas de cambio y aceleraciones en los nodos a medida que avanza el tiempo. Para esto, se

toma en cuenta un período temporal Δt y se actualiza la solución desde el instante t_n hasta $t_{n+1} = t_n + \Delta t$.

- **Método de Newmark-β beta** El enfoque de Newmark es un método numérico empleado para la integración de ecuaciones dinámicas a lo largo del tiempo. Conecta los cambios de posición, las velocidades y las aceleraciones entre dos momentos sucesivos.

  El método de Newmark aproxima los desplazamientos y las velocidades en el instante t_{n+1} mediante las expresiones: (K. Brinkgreve and Swolfs, 2018)

$$u^{t+\Delta t} = u^t + \dot{u}^t \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right) \ddot{u}^t + \alpha \ddot{u}^{t+\Delta t}\right] \Delta t^2 \tag{2.73}$$

$$\dot{u}^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + \left[(1-\beta)\ddot{u}^t + \beta \ddot{u}^{t+\Delta t}\right] \Delta t \tag{2.74}$$

  En las ecuaciones anteriores, Δ es el paso de tiempo. Los coeficientes α y β determinan la precisión de la integración temporal numérica. Estos no son iguales a los coeficientes α y β correspondientes al amortiguamiento de Rayleigh. Para obtener una solución estable, debe cumplirse la siguiente condición:

$$\beta \geq \frac{1}{2}, \qquad \alpha \geq \frac{1}{4}\left(\frac{1}{2} + \beta\right)^2 \tag{2.75}$$

  Estos valores proporcionan estabilidad incondicional para problemas lineales bajo las condiciones habituales del método, aunque no garantizan por sí solos la precisión de la solución.

- **Matriz de rigidez efectiva y solución incremental**

  Para un sistema lineal, la sustitución de las relaciones de Newmark en la ecuación dinámica permite obtener un sistema algebraico para cada incremento temporal:

$$k_{eff} \Delta d_{n+1} = \Delta f_{eff} \tag{2.76}$$

  En situaciones no lineales, la resolución del sistema se lleva a cabo utilizando un proceso iterativo que actualiza tanto la rigidez tangente como el vector residual hasta que se cumple el criterio de convergencia.

En un sistema lineal que incluye amortiguamiento de Rayleigh, la matriz de rigidez efectiva según el método de Newmark se puede expresar de la siguiente manera:

$$K_{eff} = K + \frac{\gamma}{\beta \triangle t} C + \frac{1}{\beta \triangle t^2} M \tag{2.77}$$

El amortiguamiento de Rayleigh se define mediante:

$$C = \alpha_R M + \beta_R K \tag{2.78}$$

donde α_R es el coeficiente asociado a la matriz de masa y β_R es el coeficiente asociado a la matriz de rigidez.

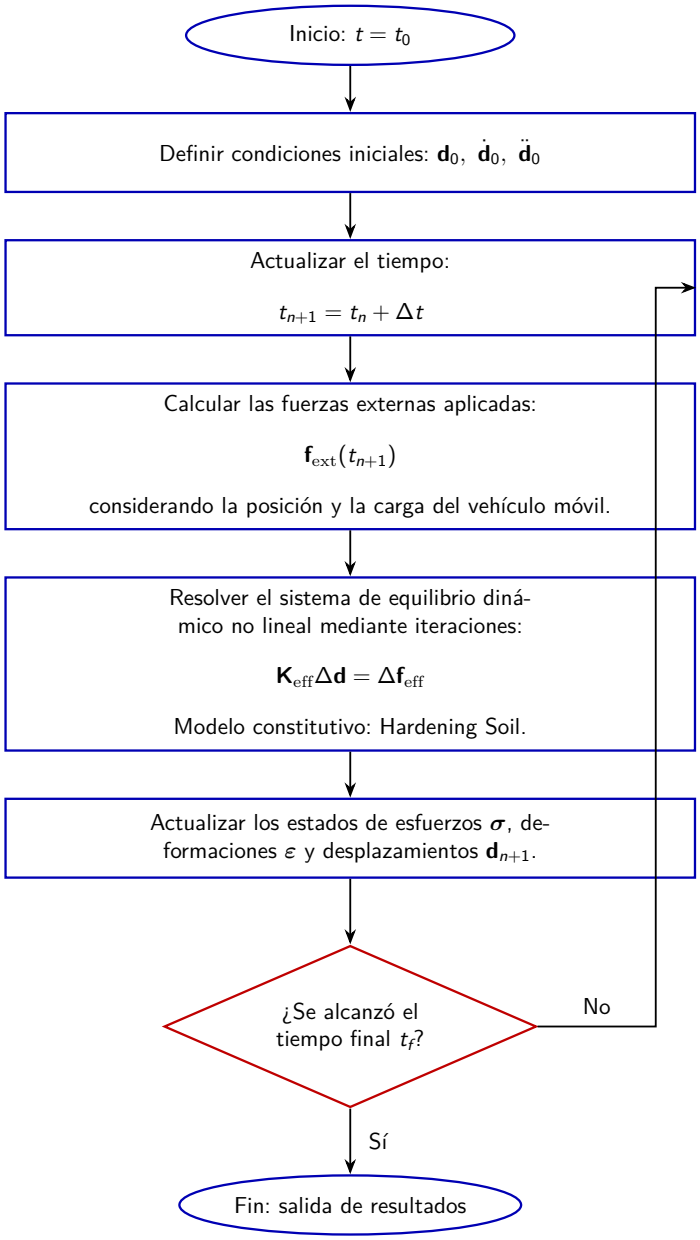
Los valores de los coeficientes de Rayleigh deben determinarse en función de las frecuencias de interés y del amortiguamiento objetivo del sistema.

El procedimiento numérico

Inicia definiendo las condiciones iniciales y los parámetros del modelo geotécnico. Luego se ajusta el tiempo de análisis y se establece la ubicación de la carga móvil de vehículos para calcular las fuerzas externas asociadas a cada intervalo temporal. El sistema de equilibrio dinámico se resuelve mediante un método iterativo, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del suelo. Una vez que se consigue una solución que converge, se actualizan los desplazamientos, las velocidades, las aceleraciones, los esfuerzos y las deformaciones. Este procedimiento continúa repitiéndose hasta que se llega al tiempo final previsto, momento en el cual se analizan los resultados obtenidos.

Figura 16

Flujograma del procedimiento numérico para el análisis dinámico



Nota: Elaboración propia

2.3.7 Modelo constitutivo

Se trata de una expresión matemática que describe la conexión entre las tensiones y las deformaciones del suelo. Su objetivo es simular de manera numérica el comportamiento mecánico del terreno, teniendo en cuenta sus características físicas y de resistencia.

2.3.8 Modelo hardening soil

El modelo Hardening Soil es un sofisticado modelo elastoplástico que se utiliza en PLAXIS, teniendo en cuenta cómo la rigidez varía con la magnitud de los esfuerzos aplicados. Facilita una representación más exacta de la respuesta no lineal del suelo en las etapas de carga, descarga y recarga, siendo muy utilizado en el estudio de terraplenes, bases y excavaciones.

2.3.9 PLAXIS 3D

Es un programa dedicado a la ingeniería geotécnica que se fundamenta en el Método de Elementos Finitos. Facilita la simulación en tres dimensiones de la respuesta del terreno teniendo en cuenta:

- Etapas constructivas.
- Modelos constitutivos avanzados.
- cargas estáticas
- Cargas dinámicas.

2.3.10 Ensayo con Deflectómetro de impacto ligero (LWD)

El deflectómetro de impacto ligero (LWD) es un dispositivo portátil empleado para medir en el lugar la rigidez y la resistencia estructural de materiales granulados, subrasantes y rellenos que son estructurales.

La prueba implica soltar un peso sobre un disco de 300 mm de diámetro, registrando al mismo tiempo la carga que se aplica y la deformación que ocurre.

2.3.11 Análisis de sensibilidad

Es el método a través del cual se examina el impacto que ocasiona el cambio de uno o varios factores del modelo en los resultados conseguidos.

En este estudio se investigaron las fluctuaciones de parámetros del modelo Hardening Soil, tales como el módulo de rigidez, el coeficiente de fricción y el ángulo de expansión, con el objetivo de determinar cuáles tienen una mayor repercusión en las deformaciones de los rellenos estructurales.

Capítulo III

Método de la Investigación

3.1 Enfoque

Esta investigación se enmarca a un enfoque cuantitativo, en el cual se trata de evaluar las dimensiones de las deformaciones en los rellenos estructurales para la conformación de terraplenes usando los métodos de elementos finitos donde a través de la simulación poder estimar las deformaciones ante solicitaciones de las cargas vehiculares que se presentan sobre estas estructuras, según Hernandez, 2020 este enfoque esta sujeto a la medición de variables (magnitud), sobre un área concreto y delimitado.

3.2 Alcance

La investigación describe y cuantifica el comportamiento deformacional de lo rellenos estructurales, identificando asentamientos, desplazamientos y campos de deformación generados por las solicitaciones de cargas vehiculares sumado el analisis entre las cargas vehiculares aplicadas y las deformaciones producidas en el rellenos estructural, evaluando la influencia de los parámetros geotécnicos de los suelos en la respuesta deformacional, mediante la aplicación de la modelación numérica tridimensional en el software PLAXIS 3D, entonces esta investigación sera definido como:

- **Descriptivo:** Caracteriza el comportamiento deformacional de los rellenos estructurales bajo diferentes condiciones de carga.
- **Explicativo:** Analiza la relación causa - efecto entre las cargas vehiculares aplicadas y las deformaciones generadas en el relleno.

3.3 Diseño de investigación

El diseño para esta investigación es de tipo no experimental transversal, ya que el objetivo es evaluar el comportamiento de los rellenos estructurales mediante simulaciones computacionales, asimismo es del tipo transversal debido a que el análisis se realiza considerando condiciones representativas del año 2025, donde estas estructuras son constantes en obras lineales y tienen interacción con las cargas vehiculares, el cual se tratara de analizar a través del método de elementos finitos para un mejor control geotécnico en la infraestructura vial.

3.4 Población y muestra

Según Hernandez, 2020 indica que la delimitación de población representa un conjunto de casos que tienen una similitud en sus características, mientras la muestra es uno de los elementos del conjunto identificado.

3.4.1 Población

La población está constituida por los sectores del tramo de la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), donde se emplean rellenos estructurales para la conformación de terraplenes y/o en el trasdós de muros de contención, sometidos a cargas vehiculares.

Unidad muestral: La unidad muestral está constituida por cada sector o zona del tramo de estudio en la que se ha ejecutado un relleno estructural para la conformación de terraplenes o un relleno en el trasdós de un muro de contención, y que presenta condiciones e información suficiente para su evaluación mediante modelación numérica.

Unidad de análisis: La unidad de análisis corresponde a los sectores ubicados en el km 1+050.00, donde existe relleno en el trasdós de un muro de contención, y en el km 1+650.00, donde se presenta un relleno estructural para la conformación del terraplén de la plataforma vial. Ambos sectores fueron seleccionados por disponer de información geotécnica, geométrica y parámetros necesarios para la modelación.

Delimitación de la población: La población se delimita al tramo de la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), ubicado en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho,

considerando los sectores donde se emplean rellenos estructurales.

Figura 17

Vista panorámica de los trabajos de relleno estructural en la carretera AY-780, Km:1+050.00 y km. 1+650.00

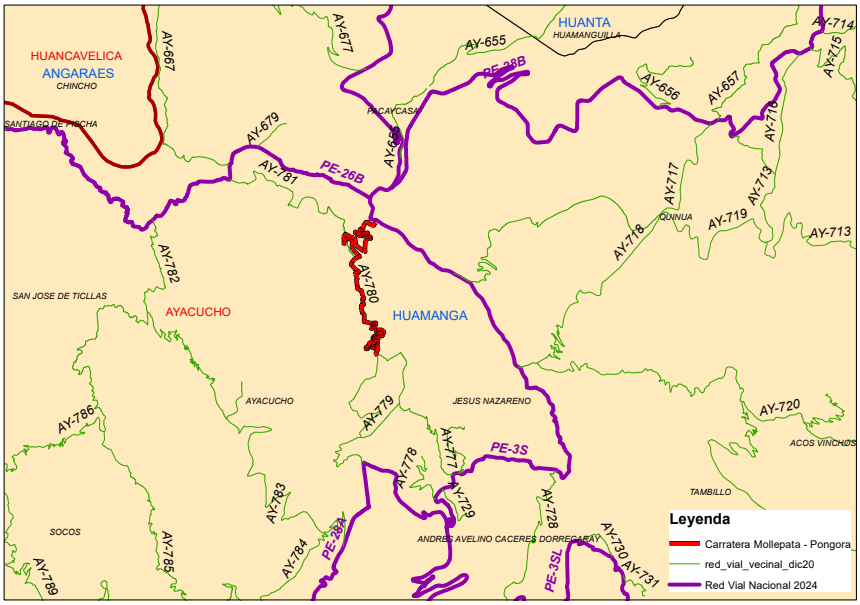


Nota: Trabajo de campo del tesista

3.4.2 Muestra del estudio

La muestra está constituida por dos sectores del tramo estudiado: km 1+050.00, correspondiente al relleno ubicado en el trasdós del muro de contención, y km 1+650.00, correspondiente al relleno estructural utilizado para la conformación del terraplén de la plataforma vial. La selección se realizó mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la disponibilidad de información geotécnica, geométrica y de los parámetros requeridos para la modelación numérica y validación de los resultados.

Figura 18
Representación de la muestra tramo EMP. AY-780 (Mollepata) - EMP.PE -3S (Pongora)



Nota: Elaboración propia

3.5 Hipótesis

Según Hernandez, 2020 define hipótesis se define como una explicación limitada, indicando que provienen de la revisión de la bibliografía y que son soluciones a los problemas planteados.

3.5.1 Hipótesis general

- A través del análisis numerico computacional podemos estimar las deformaciones producto de las cargas vehiculares sobre los rellenos estructurales en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.

3.5.2 Hipótesis específicas

- A través del método de elementos finitos podemos estimar las deformaciones en los rellenos estructurales para la conformación de terraplenes producto de las cargas vehiculares en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia

de Huamanga - Departamento de Ayacucho.

- A través del método de elementos finitos podemos estimar las deformaciones en los rellenos estructurales en trasdos de los muros de contención producto de las cargas vehiculares en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.
- El módulo de elasticidad del rellenos estructural influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones.

3.6 Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.

La Operacionalización de las variables se indica en la tabla siguiente, donde muestra la relación de las variables , indicadores y su medición:

Tabla 3

Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.

Variable de estudio	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Escala de medición	Instrumento
Variable independiente							
Cargas vehiculares	Según Machacuay Rojas (2019), son las solicitaciones externas aplicadas por los vehículos hacia la estructura del pavimento, las cuales influyen en el deterioro y comportamiento mecánico de la infraestructura vial.	Se representa mediante cargas aplicadas en el modelo numérico (estáticas y/o dinámicas), definidas por magnitud, frecuencia y configuración de ejes vehiculares.	Magnitud de carga	Carga aplicada por eje	kN	Razón	Modelación en PLAXIS 3D
			Distribución de carga	Tipo/configuración del vehículo	Adimensional	Razón	Normativa MTC / Diseño
			Condición de aplicación de carga	Velocidad del vehículo	km/h o m/s	Razón	PLAXIS 3D
Variable dependiente							
Deformaciones en rellenos estructurales	Corresponde a la respuesta deformacional del relleno estructural generada por el peso propio y las solicitaciones de cargas vehiculares.	Se evalúa mediante la deformación máxima obtenida del análisis numérico mediante el método de elementos finitos, para las diferentes condiciones de carga vehicular consideradas.	Respuesta deformacional	Deformación máxima (Uz_{max})	mm	Razón	PLAXIS 3D

Nota. Elaboración propia.

3.6.1 Variable

Es aquella variable que es estudiada después de la aplicación de las propuestas de estudio las cuales están conformadas por: Carga vehicular y deformaciones en rellenos estructurales.

3.7 Técnicas e instrumentos

3.7.1 Técnica

La técnica principal utilizada es el análisis numérico, basado en el método de los elementos finitos (MEF), el cual permite simular el comportamiento mecánico no lineal del suelo frente a solicitaciones externas, asimismo se modela la geometria del relleno estructural y la aplicación de cargas vehiculares representativas del tránsito, las cuales serán simuladas con ayuda del programa PLAXIS 3D.

3.7.2 Instrumentos

Los datos de los parámetros geotécnicos seran recolectados de la literatura especialmente de Obrzud and Truty, 2018, adicionalmente se realizara la revisión de normas técnicas, manuales de diseño, estudios geotécnicos previos de la región de Ayacucho y trabajos de investigación relacionados, los cuales constituyen instrumentos de referencia para la selección de parámetros y la validación de los resultados.

3.8 Desarrollo del trabajo de tesis

Esta investigación se desarrolló bajo un enfoque numérico computacional, mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) mediante el software PLAXIS 3D, complementando con el uso del API de PLAXIS, esto permitió automatizar el proceso de modelamiento, ejecución de simulaciones y extracción de resultados, de manera que se pudo optimizar el tiempo de procesamiento y reduciendo posibles errores asociados al manejo manual de la información. Asimismo, el uso de Python facilitó el desarrollo de rutinas para el procesamiento de datos, la obtención de indicadores cuantitativos y la generación de representaciones gráficas que contribuyeron al análisis e interpretación de los resultados.

La metodología fue seleccionada debido a la capacidad del Método de Elementos Finitos para representar el comportamiento mecánico no lineal del suelo mediante el modelo constitutivo Hardening Soil, permitiendo simular de forma realista la interacción entre las cargas vehiculares y los rellenos estructurales, tanto en terraplenes como en trasdós de muros de contencción.

El desarrollo de la investigción comprende las siguientes etapas:

1. **Recopilación y caracterización geotécnica:** Se recopiló la información geotécnica correspondiente al área de estudio mediante ensayos de laboratorio y de campo, determinándose las propiedades físicas y mecánicas del suelo necesarias para definir los parámetros del modelo constitutivo Hardening Soil.
2. **Modelamiento numérico tridimensional:** Se desarrollaron modelos tridimensionales representativos del terraplén y del relleno estructural ubicados en el trasdós del muro de contención, incorporando la geometría real del proyecto, la estratigrafía del terreno, las condiciones de frontera y las condiciones iniciales de esfuerzos. Sobre estos modelos se aplicaron cargas vehiculares móviles representadas mediante cargas puntuales equivalentes a los ejes del vehículares.
3. **Automatización mediante la API de PLAXIS y Python:** Se implementaron scripts en Python utilizando la API de PLAXIS 3D para automatizar la construcción de los modelos, la definición de fases de cálculo, la aplicación de las cargas dinámicas, la ejecución de múltiples simulaciones y la extracción sistemática de variables de interés, como desplazamientos, asentamientos y esfuerzos.
4. **Ejecución de las simulaciones numéricas:** Se realizaron los análisis dinámicos mediante el Método de Elementos Finitos, obteniéndose la evolución espacial y temporal de las deformaciones inducidas por las cargas vehiculares. Los resultados fueron almacenados en bases de datos para facilitar su procesamiento posterior.
5. **Procesamiento, análisis e interpretación de resultados:** Los resultados obtenidos fueron procesados mediante herramientas desarrolladas en Python, permitiendo generar gráficos, tablas e indicadores que facilitaron el análisis del comportamiento deformacional del relleno estructural. Asimismo, se evaluó la influencia de las cargas vehiculares y de las propiedades geotécnicas del suelo

sobre la respuesta mecánica del sistema.

6. **Validación y verificación del modelo numérico:** Finalmente, el modelo desarrollado fue validado mediante la comparación de los asentamientos obtenidos en las simulaciones con los resultados experimentales del ensayo de Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD), complementándose con la evaluación de indicadores estadísticos como RMSE y MAE. Este proceso permitió verificar la consistencia y confiabilidad del modelo numérico para representar el comportamiento deformacional.

3.8.1 Área de estudio

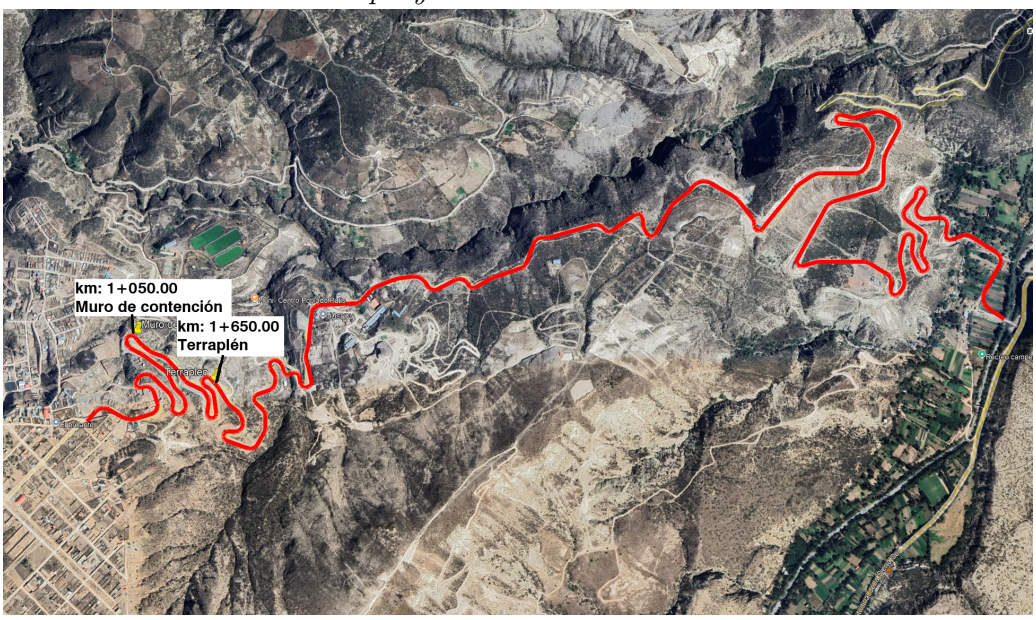
El estudio se desarrolla en la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata)- EMP.PE - 3S (Pongora), ubicado en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazarenos, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho.

Se consideran dos condiciones representativas de terraplenes.

- Rellenos estructurales en conformación de terraplenes.
- Rellenos en trasdós de un muro de contención.

Figura 19

Mapa de Ubicación satelital del proyecto



Nota: Elaboración propia

3.8.1.1 Caracterización del proyecto vial

Según el expediente: "MEJORAMIENTO Y AMPLIACIÓN DEL SERVICIO DE TRANSITABILIDAD TRAMO EMP. AY-780 (MOLLEPATA) - EMP. PE- 3S (PONGORA), EN LOS DISTRITOS DE AYACUCHO Y JESUS NAZARENO, DE LA PROVINCIA DE HUAMANGA- DEPARTAMENTO DE AYACUCHO" el diseño geométrico, el tramo tiene una longitud aproximada de 8,073 km y corresponde a una carretera de la Red Vial Vecinal de segunda clase. Entre sus principales parámetros geométricos se consideran una velocidad de diseño de 40 km/h, un ancho de calzada de 6,60 m y una pendiente longitudinal máxima de 9 %.

3.8.1.2 Clasificación vial y parámetros de diseño geométrico

Figura 20

Parámetros de diseño geométrico

Descripción	Criterio/Valor adoptado
Clasificación de la carretera (Función/Demanda/Orografía)	Red Vial Vecinal / Segunda Clase
Vehículo de diseño	C2 (Camión de 2 ejes)
Velocidad de diseño	40km/h
Radio mínimo	45 m
Radio mínimo excepcional	15m
Longitud mínima de transición	37 m.
Visibilidad de parada	40 m
Visibilidad de paso	170 m
Pendiente máxima	9.0%
Pendiente mínima	0.5%
Longitud mínima de curva vertical Convexa	50m
Longitud mínima de curva vertical Cóncava	50m
Derecho de vía	20m (10m a cada lado del eje)
Ancho de calzada	6.60m.
Ancho de bermas	0.50m
Sobreancho de Compactación SAC	0.30m
Sobreancho mínimo	0.80m
Sobreancho normal	De acuerdo a la fórmula de la Tabla 402.04.
Bombeo	2.5%
Peralte máximo	8% - 12%
Taludes	De acuerdo al Estudio Geológico Geotécnico.
Cunetas	De acuerdo al Estudio Hidrológico-Hidráulico.
Superficie de rodadura	Asfalto en caliente
Carpeta Asfaltico	7.5cm
Base Granular estabilizada con cemento	0.20m
Sub-Base	0.20m

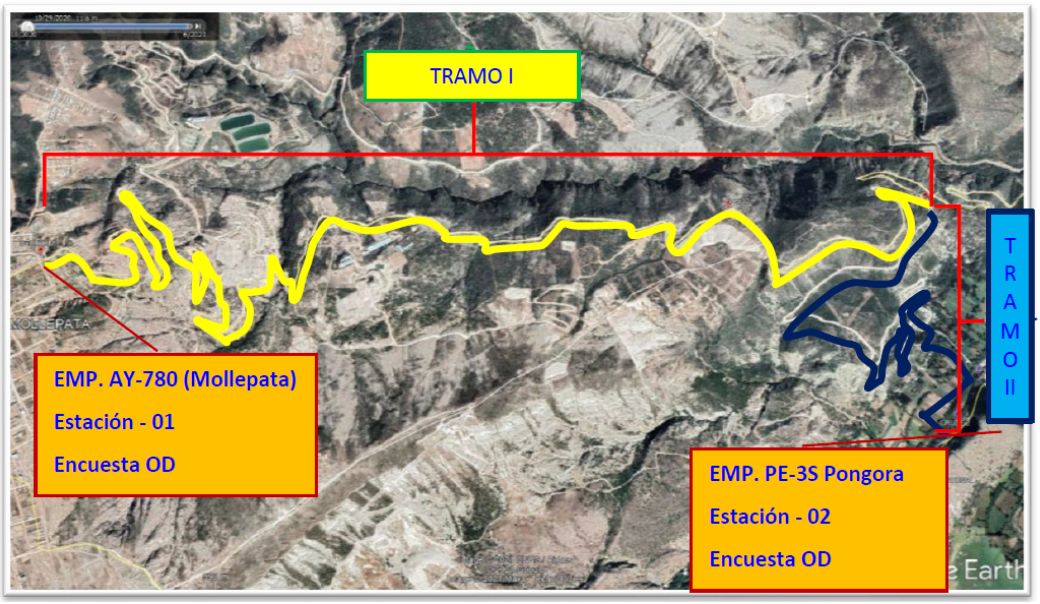
Nota: Elaboración propia

3.8.1.3 Características del tránsito y ejes equivalentes

Las características del tránsito, el estudio correspondiente registra un IMDa actual de 29 vehículos/día y una proyección de 425 vehículos/día al finalizar el horizonte de evaluación de diez años.

Figura 21

Tramos Homogéneos de flujo vehicular Mollepata- Pongora



Nota: Elaboración propia

Los días que fueron realizados el conteo de vehículos, fueron: Los días: lunes 28, martes 29 y miércoles 30 del mes de junio del 2021; jueves 01, viernes 02, sábado 03 y domingo 04 del mes de julio del año 2021. Se tiene en cuenta que el flujo por este tramo de aforo vehicular es reducido.

Figura 22

Mapa de Ubicación satelital del proyecto



Nota: Elaboración propia

Resultados del conteo vehicular

- Tramo homogéneo 1: Estación 01 – Emp. AY-780 Mollepata

  La información que se muestre corresponde a la estación EST-01 que representa el conteo vehicular consolidado de un periodo de 07 días de duración.

Figura 23

Volumen vehicular por día y tipo de Vehículos Estación 01- Mollepata

Tipo de Vehículo	Tráfico Vehícular en dos Sentidos por Día							TOTAL	IMD_S	FC	IMD_A	IMD_A
	lunes	martes	miercoles	jueves	viernes	sabado	domingo	SEMANA				(VALOR ENTERO)
Automovil	5	12	7	2	5	3	4	38	5.4	1.09044491	5.9	6
Station Wagon	9	10	11	3	7	9	10	59	8.4	1.09044491	9.2	10
Pick Up	4	8	5	9	5	5	4	40	5.7	1.09044491	6.2	7
Panel	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.09044491	0.0	0
Camioneta Rural	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.09044491	0.0	0
Micro	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Bus 2E	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Bus 3E	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Camión 2E	2	2	5	-	3	1	3	16	2.3	1.05009902	2.4	3
Camión 3E	1	1	2	-	1	1	-	6	0.9	1.05009902	0.9	1
Camion 4E	-	-	-	-	-	1	-	1	0.1	1.05009902	0.1	1
Semi Trayler 2S1/2S2	-	-	-	-	-	-	1	1	0.1	1.05009902	0.1	1
Semi Trayler 2S3	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Semi Trayler 3S1/3S2	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Semi Trayler >=3S3	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Trayler 2T2	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Trayler 2T3	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Trayler 3T2	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
Trayler >=3T3	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.05009902	0.0	0
TOTAL	**21**	**33**	**30**	**14**	**21**	**20**	**22**	**161**	**23.0**		**24.8**	**29**

Nota: Elaboración propia

- Tramo homogéneo 2: Estación 02 – Emp. AY-780 Pongora

  El aforo vehicular en la estacion 02 se implementó Por un dia, con la unica finalidad de conocer el volumen de tráfico vehicular existente en la carretera PE -3S en Pongora, que permita hacer una estimación de tráfico vehicular desviado en el supuesto caso de que existiera la via del proyecto ejecutado. Para esto tambien se utiliza la encuesta de Origen-Destino.

Figura 24

Volumen vehicular por día y tipo de Vehículos Estación 02- Pongora

Tipo de Vehículo	lunes	martes	miércoles	jueves	viernes	sábado	domingo	TOTAL	IMD_S	FC	IMD_A	IMD
Automovil	682	-	-	-	-	-	-	682	682.0	1.0904	743.7	744
Station Wagon	89	-	-	-	-	-	-	88.5	88.5	1.0904	96.5	97
Pick Up	566	-	-	-	-	-	-	565.5	565.5	1.0904	616.6	617
Panel	5	-	-	-	-	-	-	5	5.0	1.0904	5.5	6
Camioneta Rural	427	-	-	-	-	-	-	426.5	426.5	1.0904	465.1	466
Micro	14	-	-	-	-	-	-	14	14.0	1.0501	14.7	15
Bus 2E	11	-	-	-	-	-	-	11	11.0	1.0501	11.6	12
Bus 3E	15	-	-	-	-	-	-	15	15.0	1.0501	15.8	16
Camión 2E	135	-	-	-	-	-	-	134.5	134.5	1.0501	141.2	142
Camión 3E	146	-	-	-	-	-	-	145.5	145.5	1.0501	152.8	153
Camion 4E	74	-	-	-	-	-	-	73.5	73.5	1.0501	77.2	78
Semi Trayler 2S1/2S2	-	-	-	-	-	-	-	0	0.0	1.0501	0.0	0
Semi Trayler 2S3	8	-	-	-	-	-	-	8	8.0	1.0501	8.4	9
Semi Trayler 3S1/3S2	10	-	-	-	-	-	-	10	10.0	1.0501	10.5	11
Semi Trayler >=3S3	12	-	-	-	-	-	-	12	12.0	1.0501	12.6	13
Trayler 2T2	14	-	-	-	-	-	-	14	14.0	1.0501	14.7	15
Trayler 2T3	10	-	-	-	-	-	-	10	10.0	1.0501	10.5	11
Trayler 3T2	18	-	-	-	-	-	-	18	18.0	1.0501	18.9	19
Trayler >=3T3	18	-	-	-	-	-	-	18	18.0	1.0501	18.9	19
TOTAL	**2251**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**2,251**	**2251.0**		**2435.2**	**2443**

Nota: Elaboración propia

Los ejes equivalentes acumulados del diseño del pavimento.

Asimismo, el expediente de diseño del pavimento flexible establece un tránsito acumulado de 267 454 ejes equivalentes, correspondiente al parámetro (W_{18}) empleado en el diseño de la estructura del pavimento.

Figura 25

Calculo de los ejes equivalentes ESAL(W18)

periodo de diseño	20	años
tasa de crecimiento	3.6	

Fd	0.5
Fc	1
Fp	1

	tipo de vehiculos		IMD	Fd	Fc	Fvp	Fp	EEdia-carril
liviano	M1		27	0.5	1	**0.001**	1	0.0118
	M1		12	0.5	1	**0.008**	1	0.0475
	M2		0	0.5	1	**0.040**	1	0.0000
	M2M3		0	0.5	1	**0.053**	1	0.0000
bus	B2		0	0.5	1	**4.608**	1	0.0000
	B3-1		0	0.5	1	**2.649**	1	0.0000
	BA-1		0	0.5	1	**5.880**	1	0.0000
camion	2E		5	0.5	1	**4.608**	1	11.5192
	3E		2	0.5	1	**3.328**	1	3.3278
	4E		2	0.5	1	**2.797**	1	2.7970
	8X4R4		0	0.5	1	**15.558**	1	0.0000
Semitrayler	T2S1		2	0.5	1	**7.942**	1	7.9425
	T2S2		0	0.5	1	**6.663**	1	0.0000
	T2Se2		0	0.5	1	**11.277**	1	0.0000
	T2S3		0	0.5	1	**6.337**	1	0.0000
trayler	T3S1		0	0.5	1	**6.663**	1	0.0000
	T3S2		0	0.5	1	**5.383**	1	0.0000
	T3Se2		0	0.5	1	**9.997**	1	0.0000
	T3S3		0	0.5	1	**5.057**	1	0.0000
	T3Se3-a		0	0.5	1	**14.612**	1	0.0000
							total	**25.6458**
		Total	50					

r	0.036	**fca**	**28.57**
n	20		
		total	**2.67E+05**

Nota: Elaboración propia

3.8.2 Técnicas de recolección de datos

En esta investigación se trabajara con datos cuantitativos que describe la propiedades mecanicas del material usado en el relleno estructural para la simulación y el análisis. En esta etapa se detalla todas las técnicas usadas para la recolección de datos, para nuestro caso se usará la técnica de análisis documental y observación experimental, teniendo en cuenta las unidades de muestreo, la muestra y sobre todo la delimitación de la población, siendo los trabajos de recolección los siguientes:

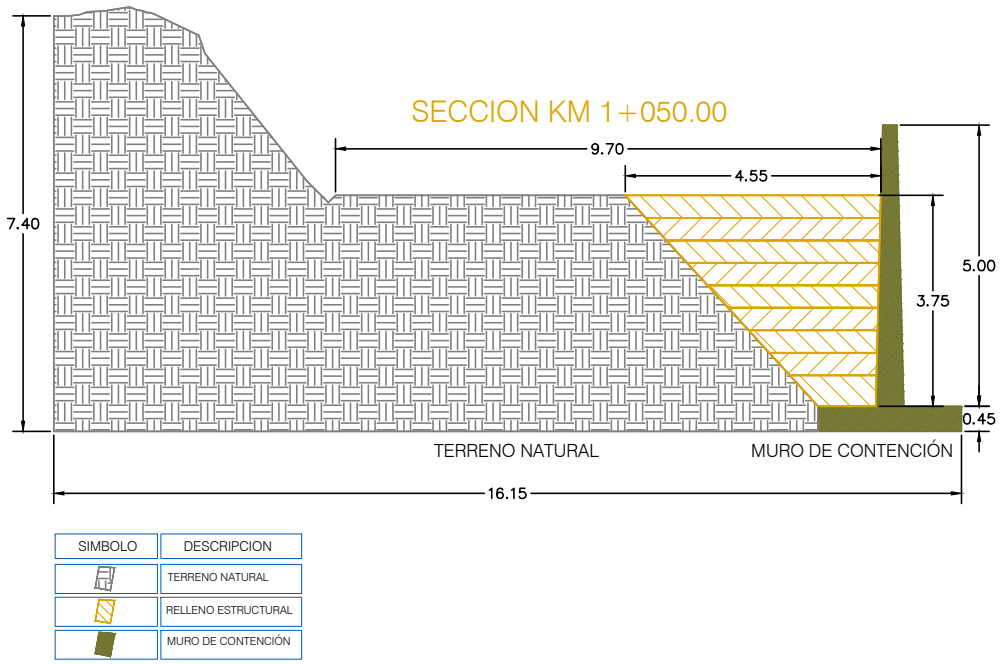
3.8.2.1 Datos de la geometría de la carretera

Tanto la geometría y las secciones de la vía se obtendrá a partir del expediente técnico: "Mejoramiento y ampliación del servicio de transitabilidad tramo EMP. AY-780 (Mollepata) - EMP.PE -3S (Pongora), de los distritos de Ayacucho y Jesús

Nazareno de la provincia de Huamanga - departamento de Ayacucho", la figura 26 y 27 muestra las secciones analizadas tanto del relleno en trasdós de muro de contención y relleno en terraplén.

Figura 26

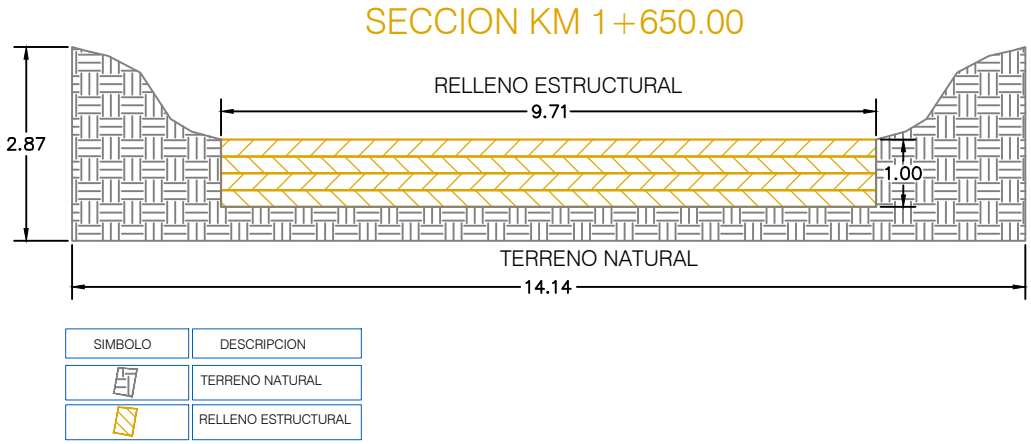
Geometría de la sección del muro de contención para el modelo de elementos finitos



Nota: Elaboración propia

Figura 27

Geometría de la sección de relleno estructural en terraplén para el modelo de elementos finitos



Nota: Elaboración propia

3.8.2.2 Propiedades geomecánicas del suelo

Para la caracterización geotécnica del relleno estructural, se consideró el material compactado en campo. Para lo cual se realizó una calicata en el relleno estructural ya conformado, a partir del cual se obtuvo una muestra representativa del material compactado.

Para la obtención de las propiedades geomecánicas del suelo, se empleó en primer lugar la técnica de observación experimental, mediante la ejecución de una calicata donde se realizó la construcción del relleno estructural. Esta muestra se analizara en el laboratorio a cargo de la empresa **INGEOTECON EIRL** para su correspondiente análisis. Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio se presentan en los Anexos, tal como se ilustra en la figura 28.

Posteriormente, los parámetros geotécnicos determinados experimentalmente fueron utilizados para la calibración en el módulo SoilTest del software PLAXIS 3D. Este módulo permite la simulación numérica de diversos ensayos de laboratorio geotécnicos, facilitando la validación y ajuste de los parámetros del modelo constitutivo. De esta manera, se busca mejorar la representabilidad del comportamiento del suelo y aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos en los análisis numéricos desarrollados.

En los ensayos de laboratorio se realizo el ensayo del Triaxial no Drenado (CU), donde se observan los resultados del ensayo de la calicata en la progresiva Km. 1+050.00.

Figura 28

Trabajos de laboratorio de las calicatas, Km:1+050.0



Nota: INGEOTECON EIRL

Tabla 4

Parámetros de resistencia

Angulo de fricción	36.1
Cohesión efectiva	5.07

Nota: INGEOTECON EIRL

El ensayo triaxial CU fue empleado exclusivamente para la determinación de los parámetros de resistencia al corte del suelo, principalmente la cohesión efectiva c' y el ángulo de fricción interna efectivo ϕ'. Estos parámetros fueron incorporados al modelo Hardening Soil utilizado en PLAXIS 3D.

Parámetros de resistencia:

- **Angulo de fricción (ϕ'):** Según el estudio de suelos realizado tenemos un valor de $\phi = 36.1$
- **Cohesión (c'):** Según el estudio de suelos tenemos un valor de $c' = 5.07$ kPa
- **Dilatancia (ψ)**: Una aproximación razonable se puede obtener utilizando la siguiente ecuación: (R. F. Obrzud, 2010)

$$\psi = \phi - 30^\circ = 36.01^\circ - 30^\circ = 6.01^\circ \tag{3.1}$$

Los resultados del ensayo triaxial CU fueron empleados para caracterizar el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo y obtener determinados parámetros de rigidez (E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref} y E_{ur}^{ref}) requeridos para la implementación del modelo Hardening Soil.

Tabla 5

Resultados del ensayo triaxial CU para caracterización del comportamiento esfuerzo-deformación

ENSAYO TRIAXIAL CU								
CU-101.4 kPa			CU-198.4 kPa			CU-300.2 kPa		
ε (%)	desv (kPa)	u (kPa)	ε (%)	desv (kPa)	u (kPa)	ε (%)	desv (kPa)	u (kPa)
0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00
0.101	82.90	0.00	0.104	86.70	-1.90	0.140	97.90	-3.90
0.201	115.50	0.70	0.207	138.00	-1.70	0.209	163.20	-4.80
0.302	146.70	0.70	0.311	196.10	-1.70	0.313	225.30	-4.80
0.403	172.90	1.30	0.414	260.30	-1.30	0.417	292.60	-5.00
0.503	192.50	2.30	0.518	327.80	-1.20	0.522	358.60	-6.50
0.604	208.80	1.30	0.622	393.70	-2.90	0.626	415.20	-8.20
0.705	221.20	0.80	0.725	457.90	-3.50	0.730	470.10	-8.50
0.806	229.90	0.70	0.829	512.30	3.70	0.835	521.30	-8.60
0.906	237.40	0.20	0.932	562.60	-6.90	0.939	566.70	-14.30
1.904	273.40	-1.30	1.959	605.20	-8.30	1.972	810.50	-14.30
2.902	288.40	-1.90	2.985	616.90	-9.10	3.006	894.70	-14.70
3.900	290.60	-2.10	4.012	617.40	-11.40	4.040	908.50	-19.00
4.898	296.60	-3.30	5.038	622.40	-16.00	5.073	890.50	-26.10
5.895	300.90	-4.40	6.065	614.30	-18.90	6.107	872.50	-29.80
6.893	312.00	-7.90	7.091	607.40	-24.40	7.141	847.60	-34.30
7.891	315.10	-8.60	8.117	608.40	-27.40	8.174	824.30	-39.10
8.889	319.50	-10.10	9.144	606.00	-29.40	9.208	804.40	-40.30
9.887	324.80	-9.50	10.170	592.20	-29.40	10.242	789.90	-41.40
10.885	332.60	-12.60	11.197	581.40	-32.80	11.275	785.50	-42.60
11.882	336.70	-12.9	12.223	568.70	-33.50	12.309	781.50	-43.20
12.880	336.30	-13.80	13.250	558.80	-34.40	13.343	787.00	-43.50
13.878	337.70	-16.50	14.276	547.00	-37.00	14.376	774.80	43.70
14.876	339.20	-16.80	15.303	537.90	-37.50	15.410	768.00	44.20
15.874	345.10	-16.50	16.329	528.00	-27.60	16.444	750.90	-45.10
16.872	345.40	-16.80	17.356	515.10	-38.00	17.477	740.70	-45.30
17.869	345.00	-17.20	18.382	502.30	-39.60	18.511	728.90	-47.50
18.867	344.90	-17.60	19.409	482.10	-40.00	19.545	717.10	-47.60
19.865	344.60	-18.00	20.435	462.30	-41.40	20.578	705.40	-49.80
20.863	344.20	-18.40	21.461	442.90	-42.40			

Nota: INGEOTECON EIRL

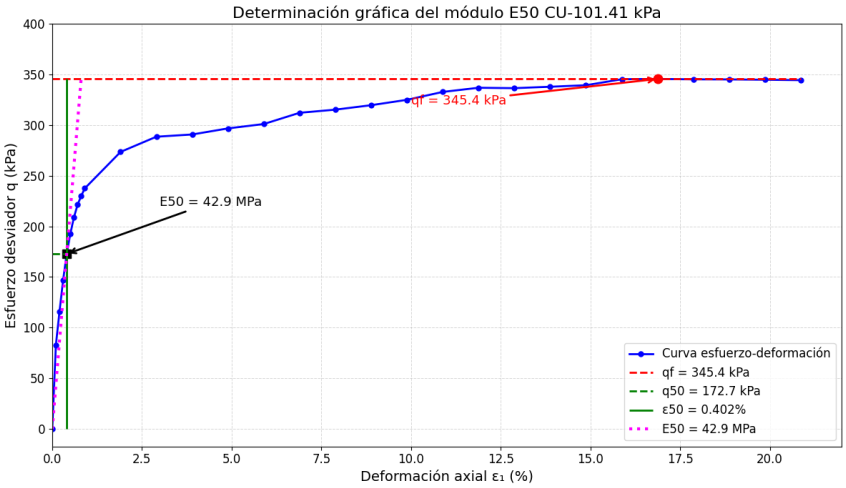
Parámetros de rigidez

- Módulo secante E_{50}^{ref}

  Primero se debe obtener el módulo secante E_{50} de cada ensayo triaxial.

Figura 29

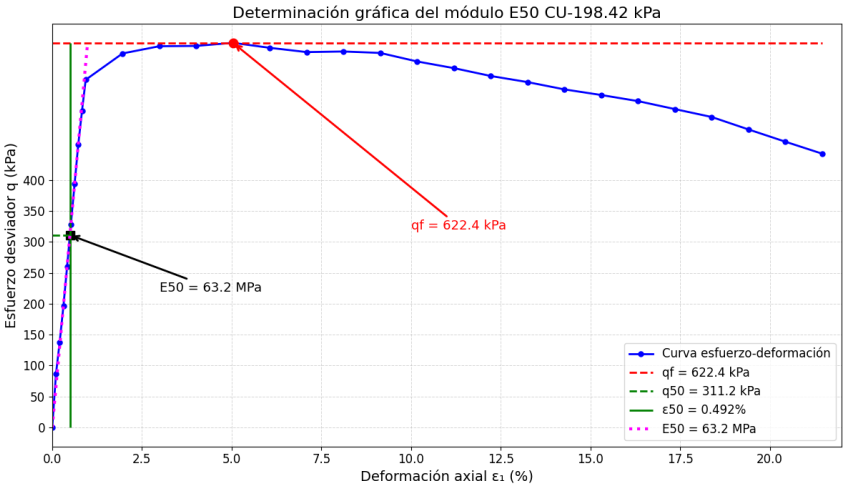
Gráfica del módulo E_{50} para CU-101.41



Nota: Elaboración propia

Figura 30

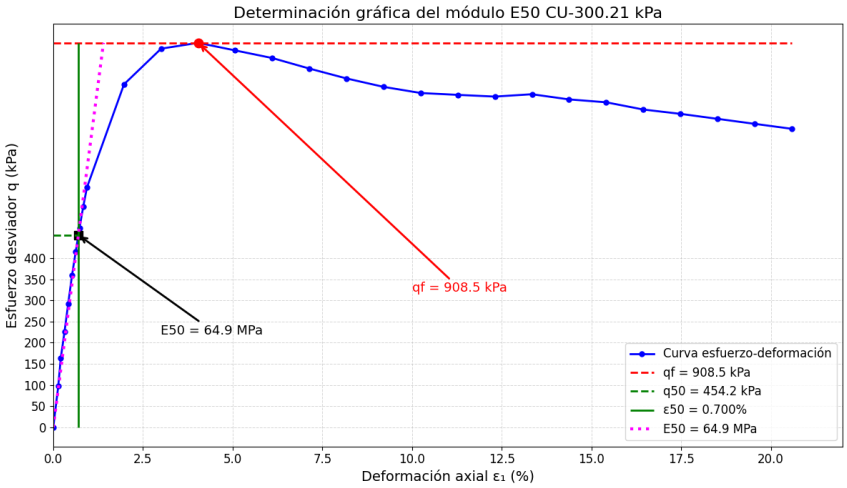
Gráfica del módulo E_{50} para CU-198.42



Nota: Elaboración propia

Figura 31

Gráfica del módulo E_{50} para CU-300.21



Nota: Elaboración propia

Para calculo el E_{50}^{ref} en el modelo Hardening Soil, primero se debe obtener el módulo secante E_{50} de cada ensayo triaxial.

Ensayo CU-101.41 kPa

De la gráfico 29 se obtiene el desviador máximo (q_f) que es aproximadamente

$$q_f = 345.5kPa \tag{3.2}$$

Se calcula $0.50.qf$

$$0.5.q_f = 172.7kPa \tag{3.3}$$

En la curva se busca la deformación correspondiente a $0.50.q_f$, mediante la interpolación entre:

$\varepsilon(\%)$	**q kPa**
0.302	146.7
0.403	172.9

$$\varepsilon_{50} = 0.40\% \tag{3.4}$$

Calculamos el valor de E_{50}

$$E_{50} = \frac{0.5q_f}{\varepsilon_{50}} = \frac{172.7}{0.00403} \approx 42.90Mpa \tag{3.5}$$

Calculamos el valor de E_{50}^{ref}, para lo cual PLAXIS utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{50} = E_{50}^{ref}(\frac{\sigma_3'}{P_{ref}})^m \tag{3.6}$$

Despejando:

$$E_{50}^{ref} = E_{50}(\frac{P_{ref}}{\sigma_3'})^m \tag{3.7}$$

Donde :

- P_{ref}: 100 kPa
- m=0.50, para arenas granulares.

$$E_{50}^{ref} = 42.9(\frac{100}{101.41})^{0.50} = 42.70 \tag{3.8}$$

Ensayo CU-198.42 kPa:

De la gráfico 30 se obtiene el desviador máximo (q_f) que es aproximadamente

$$q_f = 622.4kPa \tag{3.9}$$

Se calcula $0.50.qf$

$$0.5.q_f = 311.2kPa \tag{3.10}$$

En la curva se busca la deformación correspondiente a $0.50.q_f$, mediante la interpolación entre:

$\varepsilon(\%)$	**q kPa**
0.414	260.3
0.518	327.8

$$\varepsilon_{50} = 0.492\% \tag{3.11}$$

Calculamos el valor de E_{50}

$$E_{50} = \frac{311.2}{0.00492} \approx 63.30 Mpa \tag{3.12}$$

Calculamos el valor de E_{50}^{ref}, para lo cual PLAXIS utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{50}^{ref} = 63.3(\frac{100}{198.42})^{0.50} = 44.90 \tag{3.13}$$

Ensayo CU-300.21 kPa:

De la gráfico 31 se obtiene el desviador máximo (q_f) que es aproximadamente

$$q_f = 908.5 kPa \tag{3.14}$$

Se calcula $0.50.qf$

$$0.5.q_f = 454.3 kPa \tag{3.15}$$

En la curva se busca la deformación correspondiente a $0.50.q_f$

$\varepsilon(\%)$	**q kPa**
0.626	415.2
0.730	470.1

$$\varepsilon_{50} = 0.700\% \tag{3.16}$$

Calculamos el valor de E_{50}

$$E_{50} = \frac{454.3}{0.00700} \approx 64.90 Mpa \tag{3.17}$$

Calculamos el valor de E_{50}^{ref}, para lo cual PLAXIS utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{50}^{ref} = 64.9(\frac{100}{300.21})^{0.50} = 37.50 \tag{3.18}$$

Tabla 6

Resumen para la obtención del E_{50}^{ref}

Módulo secante triaxial de referencial E_{50}^{ref}						
Ensayo	σ_3 **(kPa)**	q_f **(kPa)**	$0.50q_f$ **(kPa)**	$\varepsilon_{50}\%$	E_{50}	E_{50}^{ref} **(MPa)**
CU-101	101.41	343.4	172.7	0.403 %	42.9	42.7
CU-200	198.42	622.4	311.2	0.492%	63.3	45.0
CU-300	300.21	908.5	454.3	0.700 %	64.9	37.5
					Promedio	42.00 MPa

Nota: Elaboración propia.

- Módulo de descarga - recarga E_{50}^{ref}:

  Representa la rigidez del suelo durante ciclos de descarga y recarga. (R. F. Obrzud, 2010)

$$E_{ur}^{ref} \approx (3-5)E_{50}^{ref} \tag{3.19}$$

$$E_{ur}^{ref} \approx 120MPa \tag{3.20}$$

- Módulo edométrico E_{oed}^{ref}:

  Representa la rigidez obtenida en ensayos de consolidación unidimensional, al no contar con un ensayo edométrico se realiza la estimación. Según Xiaomeng Shi, (2023, indica una relación experimental de 1 ∶ 1.

$$E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref} \tag{3.21}$$

$$E_{oed}^{ref} \approx 42MPa \tag{3.22}$$

Parámetros adicionales

En la tesis realizada, no se cuenta con todos los ensayos necesarios para obtener todos los parámetros del modelo Hardening Soil. En estos casos haremos uso de correlaciones existentes en la literatura.

- Módulo de Poisson en estado de carga y recarga: Generalmente varían entre 0.15 - 0.25, adoptándose generalmente 0.2 como un valor apropiado para la mayoría de suelos.
- Para la mayoría de suelo, la relación de falla Rf varía entre 0.75 a 1.00, un valor promedio de 0.90 puede ser adoptado para la mayoría de suelos.
- La presión de referencia utilizada para normalizar los parámetros de rigidez del modelo HS en PLAXIS por defecto es igual a: $P_{ref} = 100\text{kPa}$.
- Coeficiente de presión lateral en reposo se usa generalmente la ecuación de jaky. $K_0^{NC} = 1 - sin(\phi) = 1 - sin(36.1°) = 0.411$
- OCR (Over Consolidation Ratio), representa el grado de sobreconsolidación del suelo. OCR=1, Suelo normalmente consolidado NC

Tabla 7

Propiedades de los materiales para el modelo Hardening Soil

	Propiedades de los materiales	
Parametro	**Descripción**	**Relleno estructural**
Model	Modelo del material (Model)	HS
γ_{unsat}	Peso unitario seco	18 $kN/m3$
γ_{sat}	Peso unitario saturado	20 $kN/m3$
E_{50}	Modulo de elasticidad secante	42.00$e3$ kPa
E_{oed}	Modulo edometrico	42.00$e3$ kPa
E_{ur}	Modulo de descarga y recarga	120.0$e3$ kPa
v	Relación de poisson	0.20
c	Cohesión	5.07 kPa
ϕ	Ángulo de fricción	36.10°
ψ	Ángulo de dilatancia	6.10°
m	Dependecia de esfuerzo	0.5
P_{ref}	Presión de referencia	100 kPa
OCR	Relación se sobreconsolidación	1
Rf	Relación de falla	0.90

Nota: Elaboración propia.

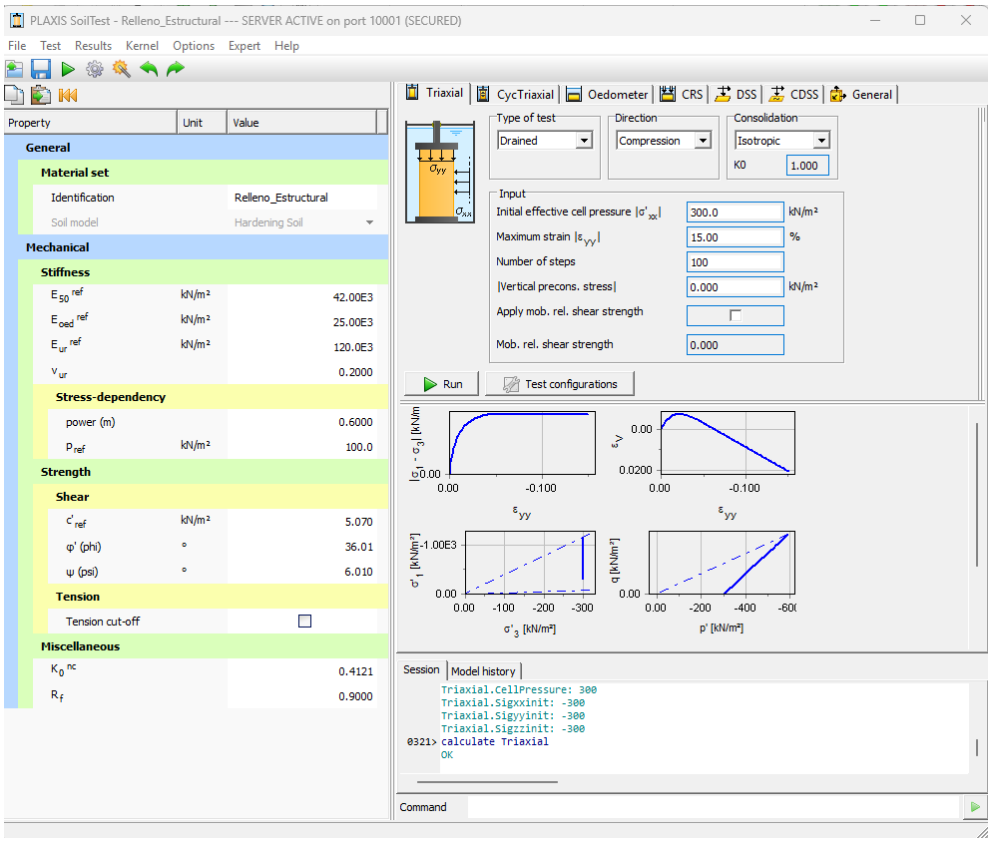
La herramienta SoilTest de PLAXIS es la forma más adecuada de calibrar los parámetros del modelo Hardening Soil, por que permite reproducir virtualmente los ensayos triaxiales y comparar las curvas numéricas con las curvas experimentales $q-\varepsilon_1$. A partir de la tabla 7, se realizara calibración de los parámetros para el modelo Hardening Soil.

A partir de estos ensayos numéricos, se ajustaron los parámetros del modelo Hardening Soil hasta obtener curvas de esfuerzo - deformación coherentes con el comportamiento esperado de suelos compactados, garantizando así la representabilidad del modelo numérico.

La calibración mostrada en la figura 33 indica que el modelo Hardening Soil aún no reproduce adecuadamente el comportamiento experimental de los tres ensayos triaxiales. Las curvas muestran un rápido incremento inicial de resistencia, además una degradación de resistencia asociada a la dilatancia.

Figura 32

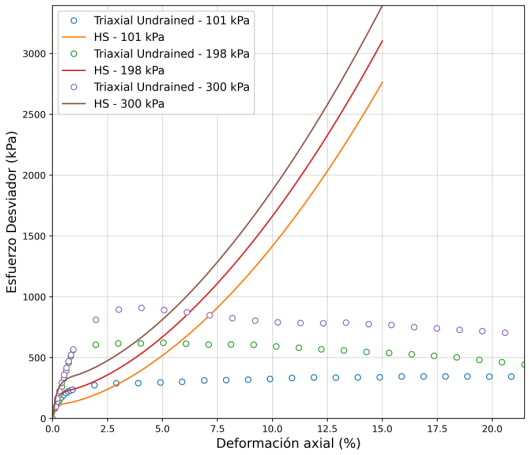
Módulo de soiltest de PLAXIS 3D



Nota: Elaboración propia

Figura 33

Grafico del modelo Hardening soil



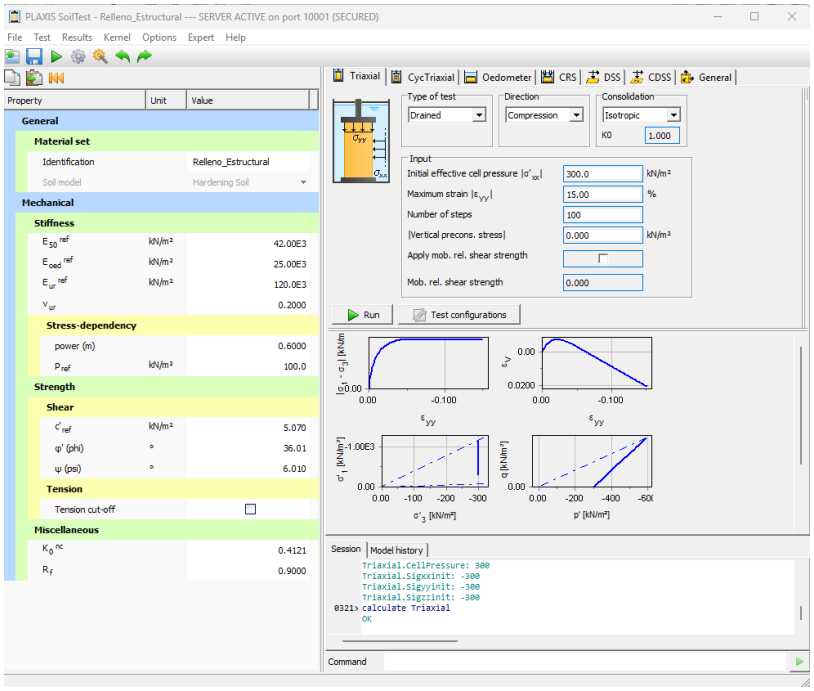
Nota: Elaboración propia

En la figura 35 se observa que las curvas de esfuerzo desviador vs deformación axial simulados con los parámetros obtenidos de los ensayos de laboratorio en el módulo del soiltest para un modelo HS logra capturar la tendencia hiperbólica de la muestra del suelo. Existe una buena concordancia en la rigidez inicial (la pendiente de la

curva al principio del ensayo), lo que indica que el parámetros E_{50} ha sido bien calibrado. Las lineas continuas son la representación de los ensayos simulados con los parámetros obtenidos de los ensayos de laboratorio, mientras que los puntos representan el comportamiento hiperbólico de la muestra de suelo.

Figura 34

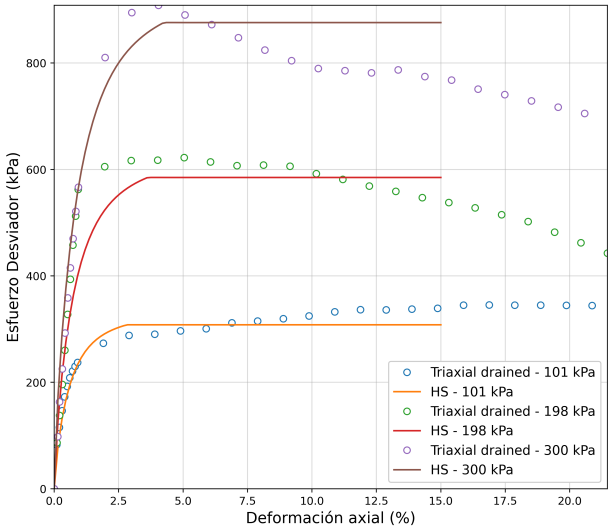
Módulo de soiltest de PLAXIS 3D



Fuente: Elaboración propia

Figura 35

Grafico del modelo Hardening soil



Nota: Elaboración propia

Tabla 8

Parámetros para el modelo Hardening Soil Calibrados

	Propiedades de los materiales	
Parametro	**Descripción**	**Relleno estructural**
Model	Modelo del material (Model)	Hardening Soil
Type	Tipo de comportamiento del material	Drenado
γ_{unsat}	Peso unitario seco	18 kN/m^3
γ_{sat}	Peso unitario saturado	20 kN/m^3
E_{50}	Modulo de elasticidad secante	$42.0e^3$ kPa
E_{oed}	Modulo edometrico	$25.0e^3$ kPa
E_{ur}	Modulo de descarga y recarga	$126.0e^3$ kPa
v	Relación de poisson	0.20
c	Cohesión	5.07 kPa
ϕ	Ángulo de fricción	36.01°
ψ	Ángulo de dilatancia	6.01°
m	Dependecia de esfuerzo	0.5
P_{ref}	Presión de referencia	100 kPa
R_f	Relación de falla	0.88

Nota: Elaboración propia.

Para las características del suelo en la zona de estudio, según estudios geotécnicos en la región de Ayacucho (Huamanga y alrededores), predominan suelos granulares (arena limosa con grava - SM), de baja cohesión (casi nula).

Los parámetros geotécnicos del suelo de fundación fueron determinadas considerando la naturaleza granular del terreno predominantes en la zona de estudio (Ayacucho), caracterizado por arena limosas con grava (SM)

Tabla 9

Parámetros para el modelo Mohr Coulomb

	Propiedades de los materiales	
Parametro	**Descripción**	**Suelo de fundación**
Model	Modelo del material (Model)	Morh Coulomb
γ_{unsat}	Peso unitario seco	18 kN/m^3
γ_{sat}	Peso unitario saturado	20 kN/m^3
E_{ref}	Modulo de elasticidad	50.0e3 kPa
v	Relación de poisson	0.30
c	Cohesión	1 kPa
ϕ	Ángulo de fricción	35°
P_{ref}	Ángulo de dilatancia	5°

Nota: Elaboración propia.

Tabla 10

Parámetros del concreto

	Concreto f'c=210 kg/cm2	
Parametro	**Descripción**	**Suelo de fundación**
Model	Modelo del material (Model)	Lineal Elástico
Type	Tipo de comportamiento del material	No poroso
γ_{unsat}	Peso unitario seco	24 kN/m^3
E_{ref}	Modulo de elasticidad	21316778.96 kN/m^2
Rinter	Factor de reducción de interfaz	Rígido
v	Relación de poisson	0.2

Nota: Elaboración propia.

3.8.2.3 Definición de las cargas vehiculares

Las solicitaciones de carga se definen considerando:

- Vehiculos de carga pesado, según el Manual de Carreteras del MTC
- Cargas por eje del contacto neumático - suelo.

Las cargas se aplican sobre la superficie del relleno estructural en la zona de rodadura.

Tabla 11

Cargas Vehiculares más incidentes del reglamento Nacional de Vehiculos (RNV)

Cargas Vehiculares						
Configuración vehicular	**N° ejes**	**Descripción**	**Longitud máx (m)**	**Eje delantero (ton)**	**Eje posterior (ton)**	**Peso bruto máx (ton)**
C2	2		12.30	7	11	18
C3	3		12.30	7	18	25
C4	4		12.30	7	23	30

Nota: Elaboración propia.

3.8.3 Modelamiento númerico en PLAXIS 3D

La investigación se desarrolla mediante la modelación numérica tridimensional usando PLAXIS 3D.

- **Escenario 1: Terraplén vial:** Se modela un relleno estructural sometido a una carga vehicular dinámicas.
- **Escenario 2: Trasdós de muro de contención:** Se evalúa el comportamiento del relleno confinado detrás de un muro, sometido a una carga vehicular dinámica.

3.8.3.1 Dimensiones, tamaño y Geometría del modelo numérico

Se construyen dos modelos tridimensionales tanto la conformación terraplén y del relleno en muro de contención.

- Estrato de suelo de fundación.
- Relleno estructural en terraplén. (Escenario 1)
- Relleno estructural en trasdós de muro de contención. (Escenario 2)

Según Delft Plaxis, 2004, las dimensiones del modelo deben ser lo suficientemente grandes para evitar que los límites laterales y la base restrinjan el desarrollo natural de las deformaciones. Es común ubicar las fronteras laterales a una distancia mínima equivalente a entre dos y cinco veces el ancho de la zona cargada, mientras que la profundidad del modelo suele establecerse entre dos y cuatro veces dicho ancho, dependiendo del problema analizado en análisis geotécnicos.

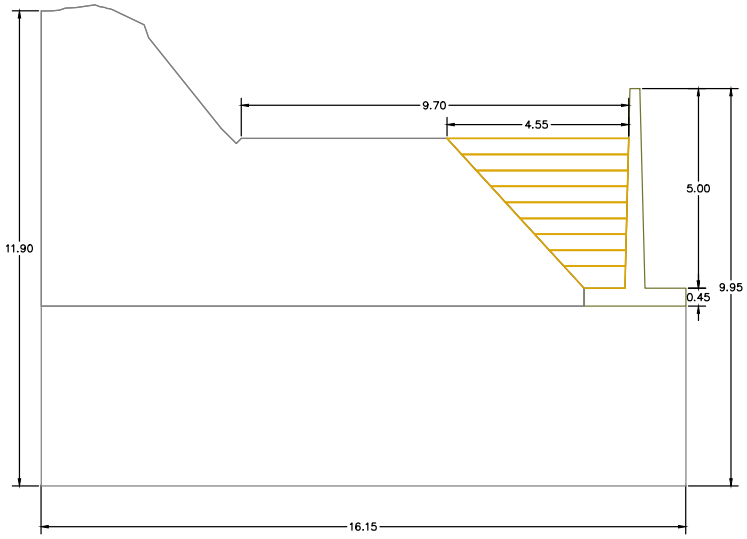
Las dimensiones adoptadas para el modelo fueron las siguientes:

- Eje X (dirección transversal): 16.50
- Eje Y (dirección longitudinal): 25.00

- Eje Z (profundidad máxima del dominio): 11.90

Figura 36

Dimensiones del dominio del modelo de muro de contención



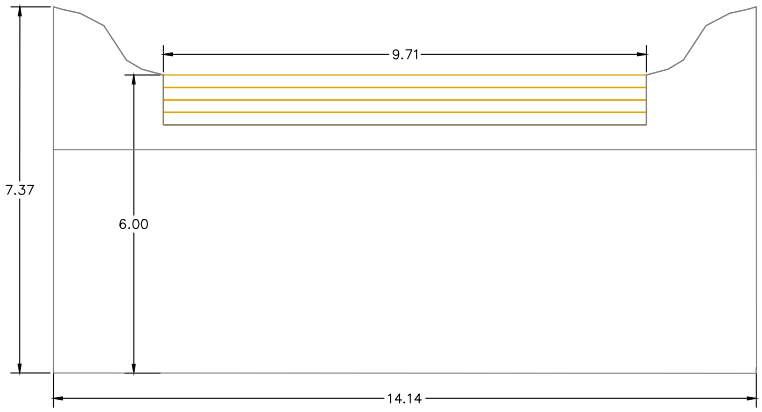
Nota: Elaboración propia

La geometría incluyó el terreno natural, el muro de contención de 5.00 de altura y el relleno estructural ubicado en el trasdós del muro con un ancho superior de 4.55m. Las dimensiones del dominio fueron definidas de manera que las fronteras numéricas se ubicaran suficientemente alejadas de la zona de aplicación de las cargas vehiculares. Las dimensiones adoptadas para el modelo según la sección del terraplén fueron:

- Eje X (dirección transversal): 14.14m
- Eje Y (Dirección longitudinal): 25.00m
- Eje Z (profundidad máxima del dominio): 6.00m

Figura 37

Dimensiones del dominio del modelo de terraplén

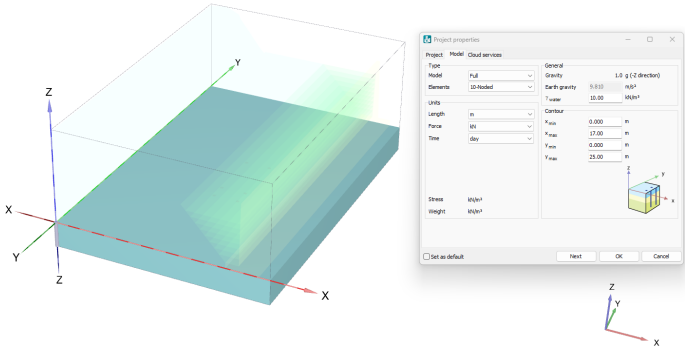


Nota: Elaboración propia

La extensión del dominio cumple los criterios recomendados para el análisis geotécnico mediante elementos finitos, asegurando que las condiciones de contorno no alteren significativamente la respuesta mecánica del modelo.

Figura 38

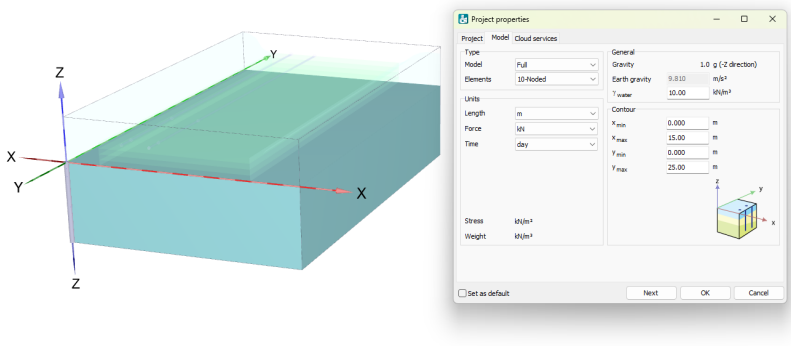
Dominio tridimensional en PLAXIS 3D para el modelo de relleno en trasdós en muro de contención



Fuente: Elaboración propia

Figura 39

Dominio tridimensional en PLAXIS 3D en relleno de terraplén



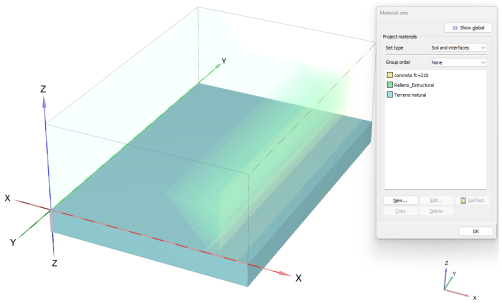
Nota: Elaboración propia

3.8.3.2 Modelo Constitutivos y parámetros geotécnicos

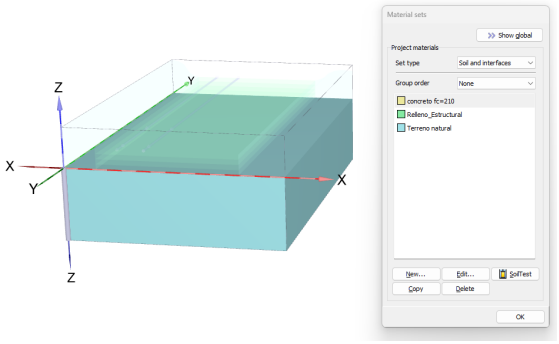
El relleno estructural fue modelada mediante el modelo constitutivo Hardening Soil (HS), debido a su capacidad para representar la dependencia de la rigidez con el nivel de esfuerzos y el comportamiento no lineal de materiales granulares compactados. El terreno natural fue representado mediante el modelo Morh Coulomb, mientras que el muro de contención fue modelado como un material lineal elástico.

Figura 40

Creación y asignación de materiales en PLAXIS 3D



(a) *Creación de materiales para el terraplén*



(b) *Creación de materiales muro de contención*

Nota: Elaboración Propia

Tabla 12

Parámetros de los modelos usados en PLAXIS 3D

Propiedades de los materiales para el modelo				
Parametro	**Descripción**	**Relleno estructural**	**Terreno natural**	**Concreto f'c=210 kg/cm2**
Model	Modelo del material (Model)	Hardening Soil	Mohr Coulomb	Lineal elástico
Type	Tipo de comportamiento del material	Drenado	-	No poroso
γ_{unsat}	Peso unitario seco	18 kN/m^3	18 kN/m^3	24 kN/m^3
γ_{sat}	Peso unitario saturado	20 kN/m^3	20 kN/m^3	-
E_{50}	Modulo de elasticidad secante	$42.0e^3$ kPa	$50.0e^3$ kPa	21316778.96 kPa
E_{oed}	Modulo edometrico	$25.0e^3$ kPa	-	-
E_{ur}	Modulo de descarga y recarga	$126.0e^3$ kPa	-	-
v	Relación de poisson	0.30	0.30	0.20
c	Cohesión	5.07 kPa	1	-
ϕ	Ángulo de fricción	36.01°	35°	-
ψ	Ángulo de dilatancia	6.01°	5°	-
m	Dependecia de esfuerzo	0.5	-	-
P_{ref}	Presión de referencia	100 kPa	-	-

Fuente: Elaboración propia.

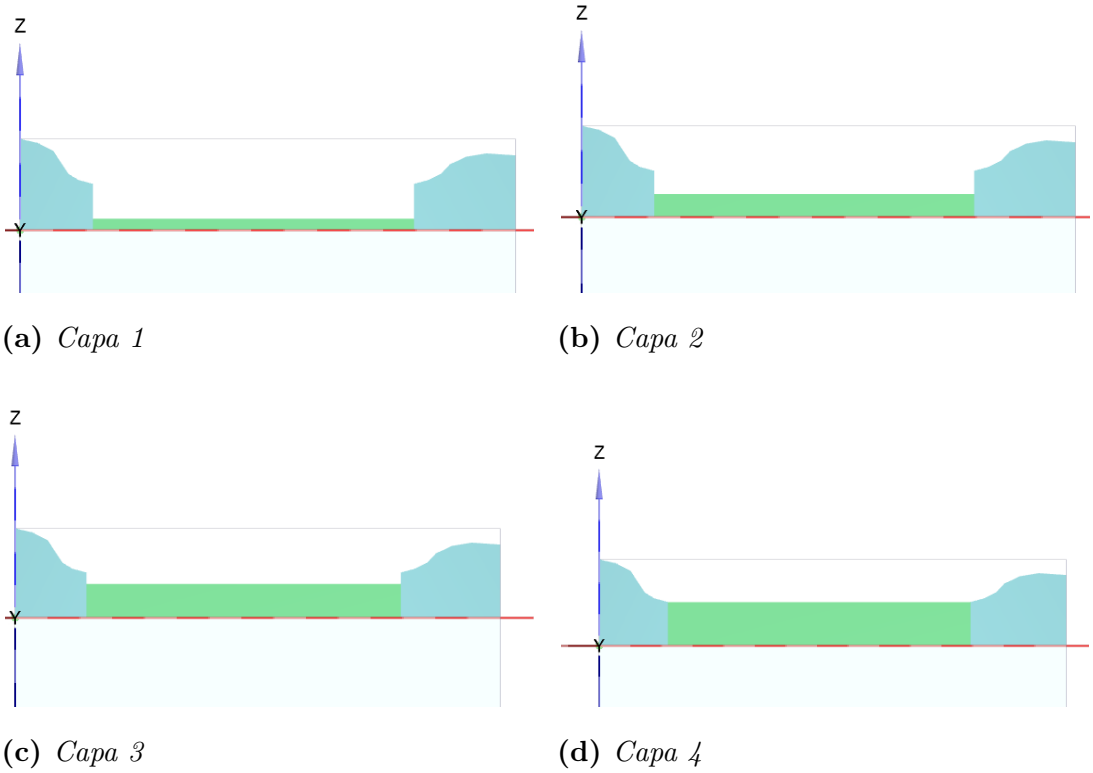
3.8.3.3 Creación de la geometría y modelación de la compactación

Se importará desde un archivo dxf las secciones tanto para la conformación del terraplén y del relleno en trasdós en muro de contención, luego se realizará la extrusión del modelo de 25 m en la dirección Y, posteriormente se implementará mediante la construccion por capas sucesivas del relleno estructural con un espesor típico de 0.25 m y 0.30 m.

En la figura 41, se observa la fase constructiva para la conformación del relleno estructural en terraplén se tiene cuatro capas de un espesor de 0.25m teniendo una altura total de 1.00 de altura del relleno estructural y en la figura 42, se observa la fase constructiva para el relleno estructural en trasdós de muro de contención teniendo 9 capas de 0.30 m de altura compactadas teniendo una altura de 2.70m de relleno estructural.

Figura 41

Simulación del proceso constructivo del relleno estructural en terraplenes en PLAXIS 3D



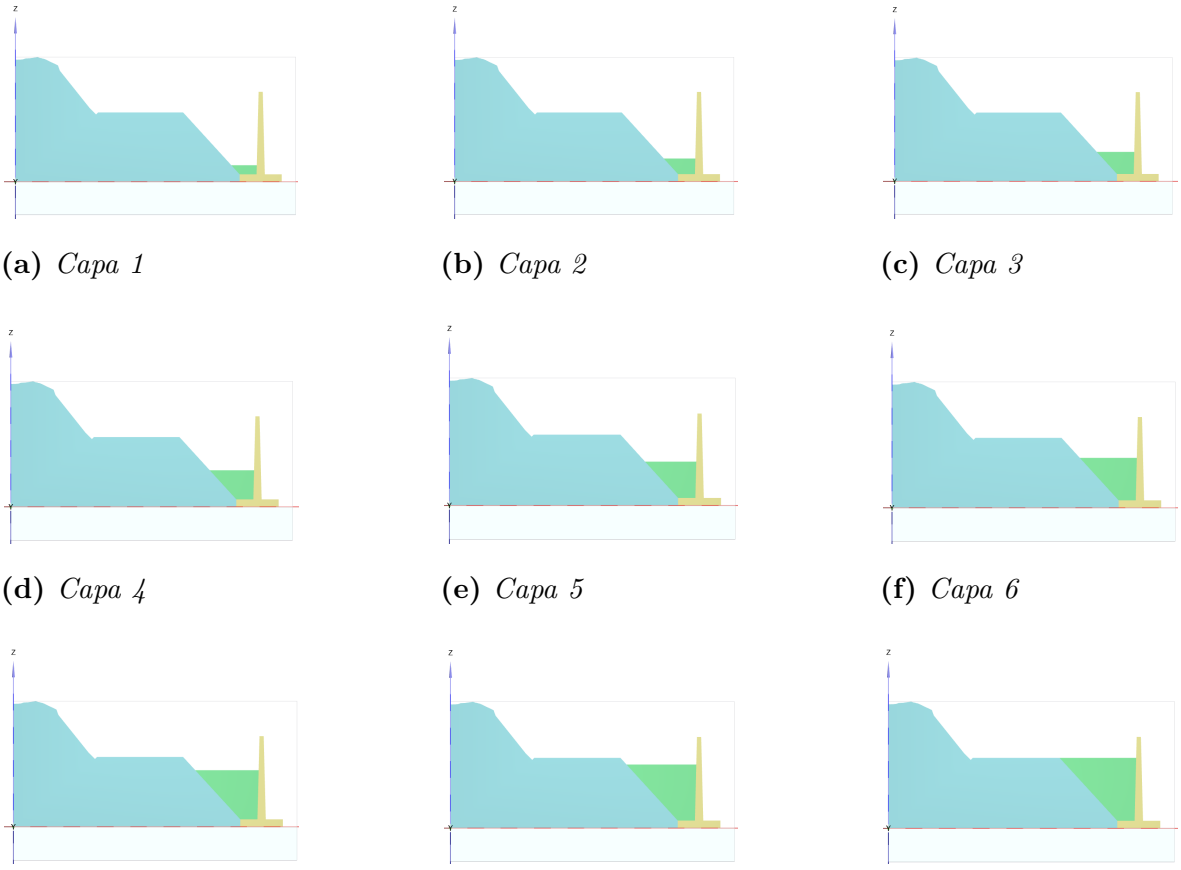
(a) *Capa 1* **(b)** *Capa 2*

(c) *Capa 3* **(d)** *Capa 4*

Nota: Elaboración propia

Figura 42

Simulación del proceso constructivo del relleno estructural en trasdós de muros de contención en PLAXIS 3D



(a) *Capa 1* **(b)** *Capa 2* **(c)** *Capa 3*

(d) *Capa 4* **(e)** *Capa 5* **(f)** *Capa 6*

(g) *Capa 7* **(h)** *Capa 8* **(i)** *Capa 9*

Nota: Elaboración propia

3.8.3.4 Modelación de la carga vehicular

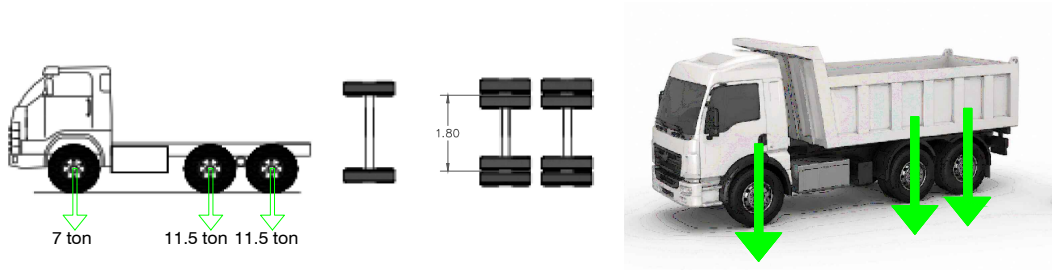
En la presenta investigación se seleccionó el camión tipo C3 como vehículo de análisis debido a que representa una de las configuraciones de transporte pesado más utilizadas para el traslado de materiales de construcción. Este tipo de vehículo es común en vías de bajp y mediano volumenn de tránsito, donde constituye una de las principales fuentes de solicitaciones sobre la infraestructura vial.

La elección del camión C3 también responde a un criterio de condición crítica de carga. Al realizar la distribución de las cargas por eje conforme a las especificaciones del reglamento nacional de vehículos, se determinó que el vehículo C3 presenta mayores cargas transmitidas por eje en comparación con otras configuracionees de vehículos de cargas consideradas para este tipo de vías.

Representación del vehículo: La carga fue modelada mediante un sistema de cargas móviles que reproduce la configuración de un camión de tres ejes, cada eje fue representado mediante cargas puntuales móviles distribuidas sobre la superfice del relleno estructural.

Figura 43

La carga vehicular del camión C3



(a) *Cargas en el camión* **(b)** *Cargas en el camión*

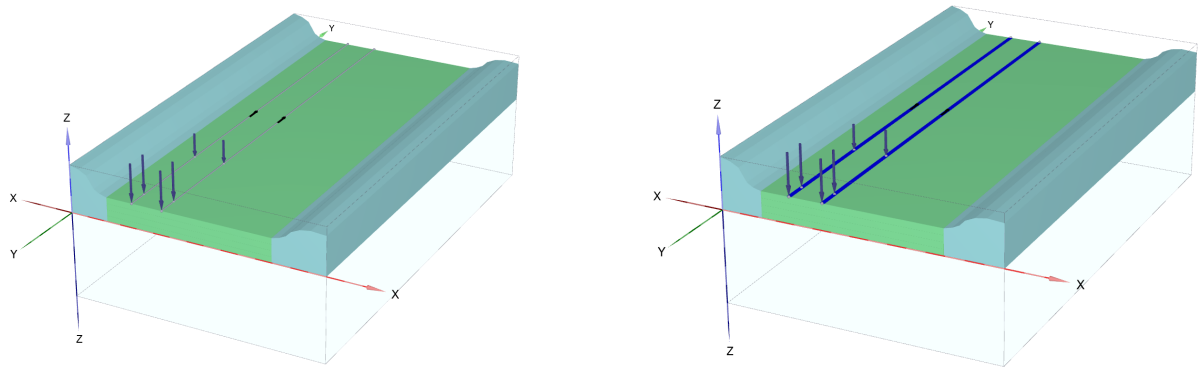
Nota: Elaboración Propia

- Eje delantero: 7.00 toneladas.
- Eje intermedio: 11.5 toneladas.
- Eje posterior: 11.5 toneladas.

La separación entre eje fue definida según la geometría real del vehículo, permitiendo reproducir adecuadamene la secuencia temporal de aplicación de cargas sobre el terreno.

Figura 44

Asignación de la carga vehicular en PLAXIS 3D en terraplén

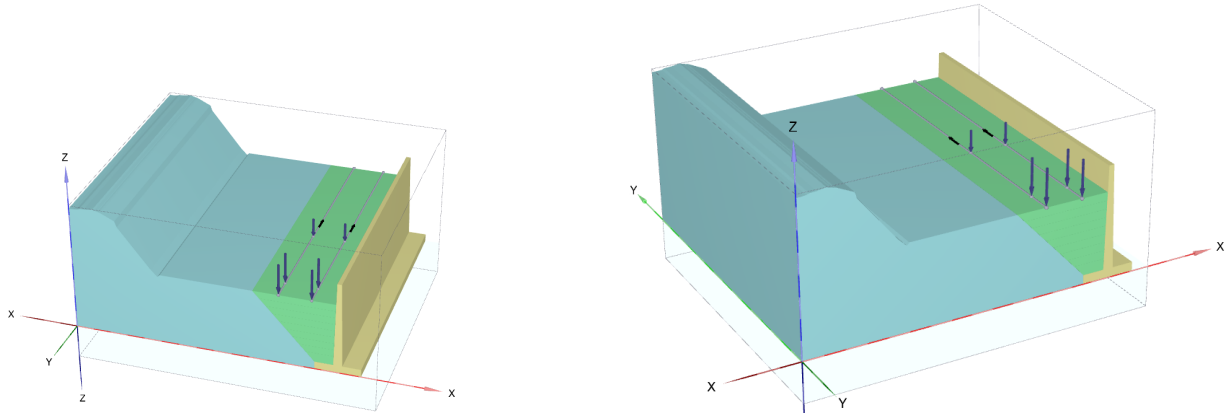


(a) *Vista 3D del modelo* **(b)** *Vista 3D del modelo*

Nota: Elaboración Propia

Figura 45

Asignación de la carga vehicular en PLAXIS 3D en trasdós de muro de contención



(a) *Vista 3D del modelo* **(b)** *Vista 3D del modelo*

Nota: Elaboración Propia

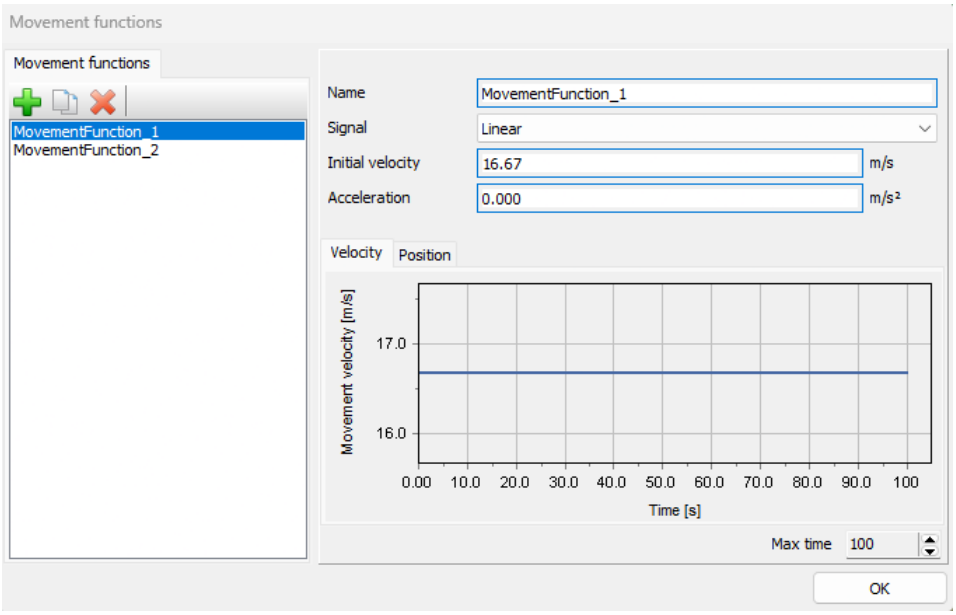
Espectro dinámico de la carga

La señal temporal utilizada en PLAXIS 3D fue definida mediante una función de movimiento lineal que reproduce el desplazamiento continuo de las cargas a lo largo de la trayectoria de circulación. Esto representación permite obtener la respuesta dinámica completa del sistema suelo - estructura, incluyendo desplazamientos instantáneos y deformaciones máximas.

Se define en Plaxis en el entorno de structures - Función de movimiento: la velocidad de desplazamiento adoptada fue de v=60 km/h equivalente a 16.67 m/s y la función de movimiento lineal.

Figura 46

Definición de la función de movimiento en PLAXIS 3D



Nota: Elaboración propia

Frecuencia de excitación vehicular: La frecuencia dominante inducida por el tránsito vehicular fue estimada a partir de la velocidad de circulación y la separación característica entre ejes.

$$f = \frac{V}{d} \tag{3.23}$$

Considerando una velocidad de 16.67 m/s y una distancia entre ejes de 1.80m, la frecuencia principal asociada al paso de carga resulta aproximadamente:

$$f = \frac{16.67}{1.80} = 13.023Hz \tag{3.24}$$

Valor que se encuentra dentro del rango de frecuencias reportadas para el tránsito pesado sobre infraestructura vial.

Amortiguamiento dinámico:

Los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh fueron determinados a partir de una amortiguamiento objetivo del $\xi = 5\%$ para materiales granulares compactados. Para ello se emplearon la frecuencia fundamental del sistema y la frecuencia asociada al tránsito vehicular. A partir de estas frecuencias se calcularon los coeficientes α y β mediante las expresiones de Rayleigh.

No se dispone de ensayos dinámicos, por lo cual se utilizaran valores reportados en la literatura. Para rellenos estructurales compactados el valor mas utilizado es:

$$\varepsilon = 5\% \tag{3.25}$$

Tenemos el valor de $f = 13.023 H_z$

Sin embargo, para calibrar Rayleigh se seleccionan dos frecuencias:

- frecuencia baja (modo fundamental).
- Frecuencia alta (frecuencia de excitación).

Tenemos frecuencias de:

$$f_1 = 1 H_z \tag{3.26}$$

$$f_2 = 13.023 H_z \tag{3.27}$$

Entonces:

$$\omega_1 = 2 * \pi(1) = 6.283 \tag{3.28}$$

$$\omega_2 = 2 * \pi(13.023) = 81.823 \tag{3.29}$$

y tenemos un valor de $\xi = 0.05$

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{2(\omega_1)} + \frac{\beta(\omega_1)}{2} \tag{3.30}$$

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{2(\omega_2)} + \frac{\beta(\omega_2)}{2} \tag{3.31}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$0.05 = \frac{\alpha}{2(6.283)} + \frac{\beta(6.283)}{2} \tag{3.32}$$

$$0.05 = \frac{\alpha}{2(81.823)} + \frac{\beta(81.823)}{2} \tag{3.33}$$

$$\alpha \approx 0.583 \tag{3.34}$$

$$\beta \approx 0.00113 \tag{3.35}$$

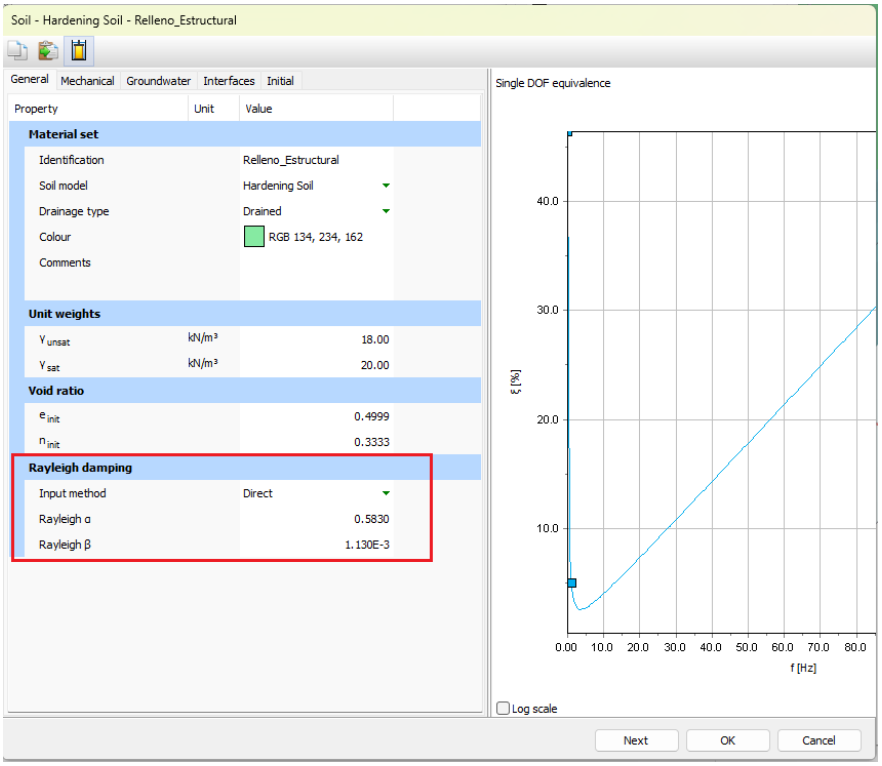
La disipación de energía durante la propagación de ondas sera representada mediante amortiguamiento de Rayleigh.

- Coeficiente de masa $\alpha = 0.583$
- Coeficiente de rigidez β=0.00113

Estos parámetros fueron incorporados directamente en el modelo Hardening Soil para representar el amortiguamiento equivalente del sistema suelo-estructura y reducir reflexiones artificiales de ondas en el dominio numérico.

Figura 47

Asignación de los valores de amortiguamiento



Nota: Elaboración propia

3.8.4 Generación de la malla

Generación de malla

La discretización espacial del dominio de realizó mediante el generador automático de malla de PLAXIS 3D, utilizando elementos tetraédricos de diez nodos, los cuales permiten representar adecuadamente geometrías complejas y gradientes de esfuerzos en problemas geotécnicos tridimensionales.

Refinamiento de la malla: Debido a que los mayores gradientes de esfuerzos y deformaciones se producen en la superficie de rodadura y en el trasdós del muro de contención, se empleó un refinamiento local en la siguiente zonas.

- Área de contacto entre la carga vehicular y el relleno estructural.
- Zona próxima a la trayectoria de las cargas móviles.

Parámetros de mallado:

La malla fue generada mediante la opción de refinamiento automático de PLAXIS 3D empleando los siguientes parámetros, con el cual se obtuvo una malla adecuada para el modelamiento tridimensional en PLAXIS 3D.

```
g_i.mesh(
"Coarseness", 0.025,
"UseEnhancedRefinements", True,
"EMRGlobalScale", 1.2,
"EMRMinElementSize", 0.005
)
```

Código Fuente 1: Código en PLAXIS 3D, usado para la generación de la malla

- **"Coarseness", 0.025:** Un valor de 0.025 corresponde a una malla bastante fina.
- **"UseEnhancedRefinements", True:** Refina automáticamente la malla alrededor de geometrías complejas, cargas.
- **"EMRGlobalScale", 1.2:** Es un factor de escala del refinamiento mejorado.
- **"EMRMinElementSize", 0.005:** Tamaño mínimo permitido para los elementos es de 0.005m (5mm), durante el refinamiento automático.

Estudio de la calidad de malla

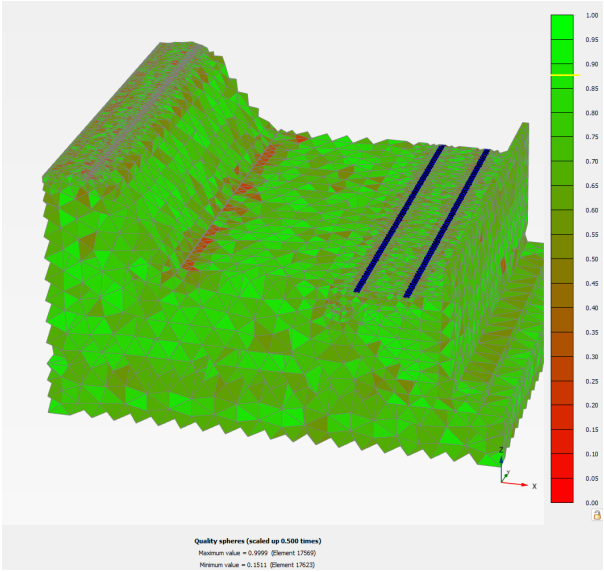
Con el propósito de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el método de los elementos finitos, se realizó una análisis de la calidad y convergencia de la malla empleada en PLAXIS 3D. La evaluación se efectuó mediante el indicador

Quality Spheres, el cual cuantifica la calidad geométrica de los elementos tetraédicos en una escala comprendida entre 0 y 1, donde valores cercanos a 1 representan elementos con una geometría óptima y valores próximos a 0 corresponder a elementos altamente distorsionados.

En la figuras 48 y 49, muestra la distribución de la calidad de los elementos generados, se observa que la mayor parte de elementos presentan valores comprendidos ente 0.80 a 1,00, representados por tonalidades verdes, lo cual indica una excelente calidad geométrica y una adecuada discretización del dominio de análisis.

Figura 48

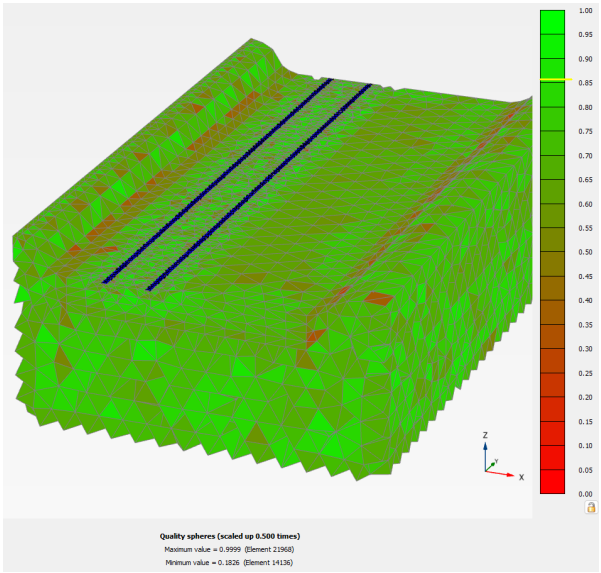
Mallado de relleno en muro de contención en PLAXIS 3D



Nota: Elaboración propia

Figura 49

Mallado de relleno en terraplén en PLAXIS 3D



Nota: Elaboración propia

Por lo tanto la malla seleccionada presenta una calidad geométrica adecuada y proporciona resultados estables, garantizando un equilibrio entre presición numérica y eficiencia computacional.

Estudio de convergencia de malla

Tabla 13

Estudio de convergencia de malla para el relleno en trasdós de muro de contención

Tipo de malla	N° de elementos	N° de Nodos	Asentamiento máximo (mm)	Variación (%)
coarse	16495	28056	5.860 mm	11.30%
Mediun	18365	31010	5.424 mm	3.02%
Fine	26570	43732	5.265 mm	0 %

Fuente: Elaboración propia.

Con una diferencia de 3.02 % entre Medium y Fine, el estudio es metodológicamente aceptable.

La malla Fine, se seleccionó para el desarrollo de las simulaciones debido a que proporciona resultados prácticamente independientes de la discretización, garantizando un equilibrio adecuado entre precisión numérica y costo computacional.

3.8.4.1 Condiciones de borde

Para los modelos se realizaran las siguientes condiciones de borde:

Base del modelo: Desplazamientos totalmente restringidos

$$u_x = u_y = u_z = 0 \tag{3.36}$$

Bordes laterales: Movimiento normal restringido

$$u_n = 0 \tag{3.37}$$

Superficie superior: Superficie libre de restricciones

$$\sigma_n = 0 \tag{3.38}$$

Dichas restricciones representan adecuadamente el comportamiento físico real, teniendo en cuenta el tipo de restricciones que se deben aplicar a los modelos se aplicaran en el software PLAXIS de la siguiente manera:

Estado inicial y construcción por etapas

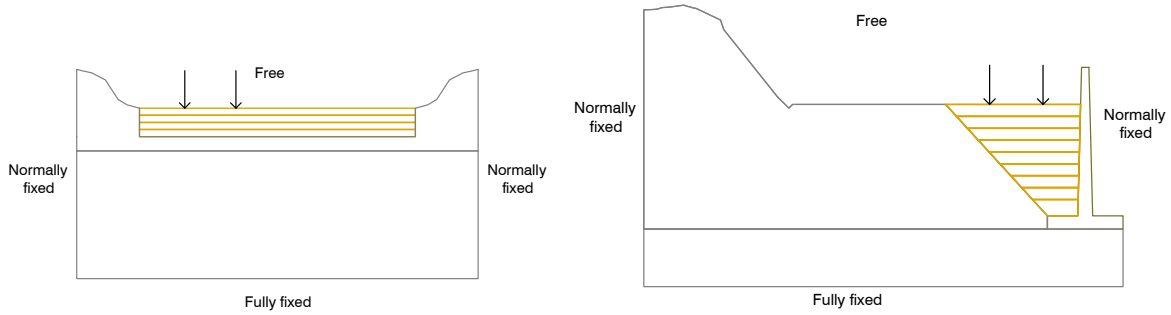
La construcción fue simulada mediante fases plásticas sucesivas, en las cuales se activó individualmente cada volumen correspondiente al terreno natural, muro de contención y relleno estructural. Esta estrategia permitió representar la redistribución gradual de esfuerzos y deformaciones producidas durante el proceso constructivo.

Condiciones de borde durante las fases estáticas

Durante las fases de construcción y estabilización se emplearon condiciones de borde convencionales para un análisis cuasiestáticos.

Figura 50

Condiciones de borde durante las fases estáticas

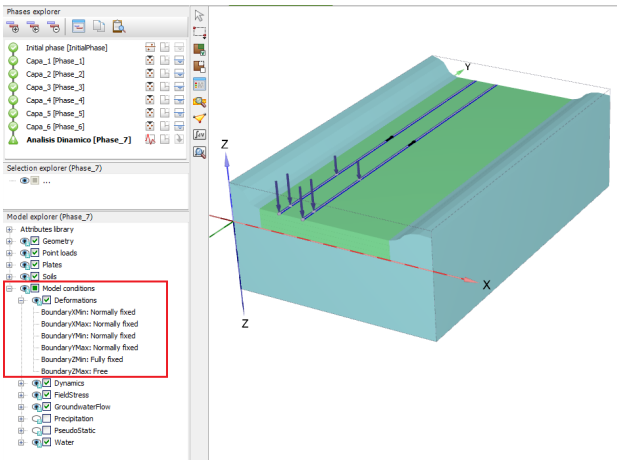


(a) *Escenario 1* **(b)** *Escenario 2*

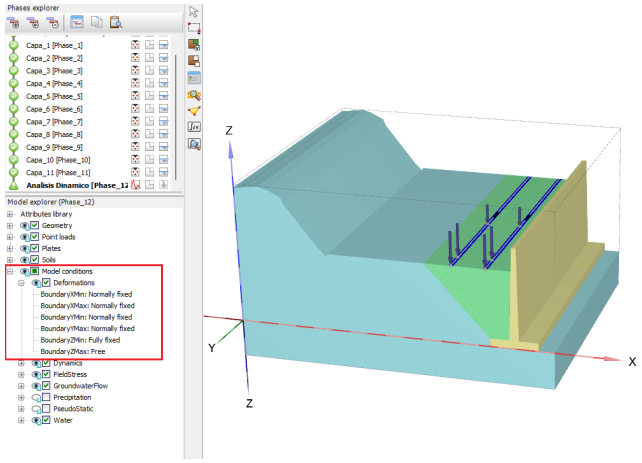
Nota: Elaboración Propia

Figura 51

Condiciones de borde estáticas en PLAXIS 3D



(a) *Escenario 1*



(b) *Escenario 2*

Nota: Elaboración Propia

- **Normally fixed:** En los lados del terreno, permite que el suelo se asiente, pero no que se ensanche lateralmente.
- **Fully fixed:** En la base del modelo, Simula que debajo hay roca infinitamente rígida que no se mueve.
- **Free:** La superficie (aire), el suelo está en contacto con el aire.

Definición de la fase dinámica

Una vez completada la construcción del sistema suelo–estructura, se generó una fase de análisis dinámico transitorio denominada ”Análisis Dinámico”.

Esta fase tomó como condición inicial el estado de esfuerzos y deformaciones alcanzado

al finalizar la última etapa constructiva, permitiendo evaluar exclusivamente la respuesta inducida por el tránsito vehicular sobre el relleno estructural.

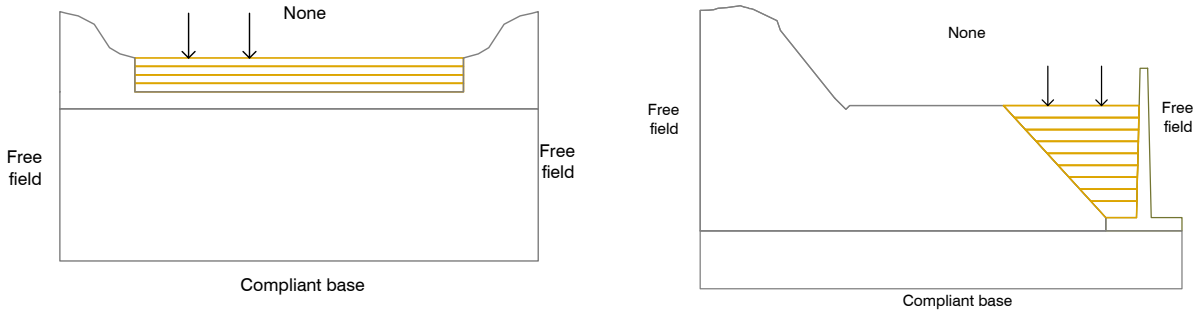
La duración total del análisis fue definida en función del tiempo requerido para que el vehículo recorriera completamente la trayectoria establecida dentro del modelo.

Condiciones de borde dinámicas

Durante la fase dinámica se mantuvieron las restricciones estáticas necesarias para conservar el equilibrio global del modelo. Adicionalmente, se incorporaron condiciones especiales de absorción de ondas para evitar reflexiones artificiales en los límites del dominio.

Figura 52

Condiciones de borde dinámicas



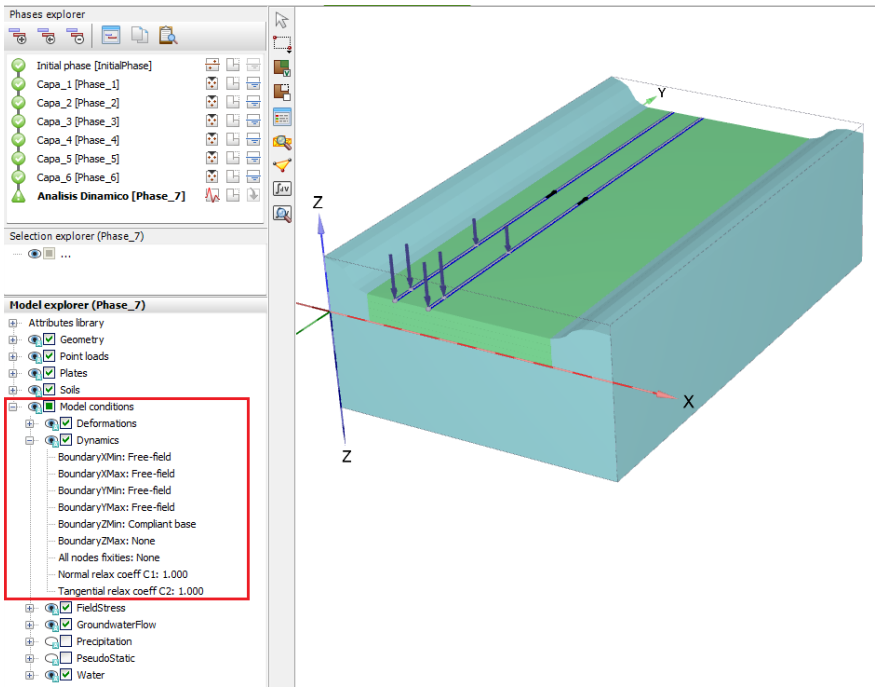
(a) *Escenario 1* **(b)** *Escenario 2*

0.2cm

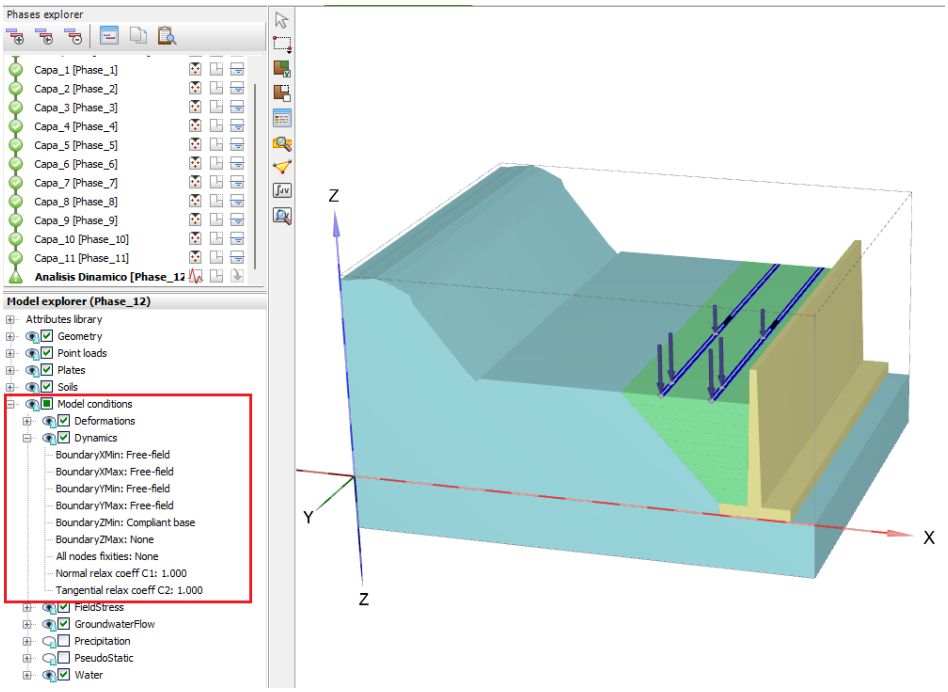
Nota: Elaboración Propia

Figura 53

Condiciones de borde en PLAXIS 3D



(a) *Escenario 1*



(b) *Escenario 2*

Nota: Elaboración Propia

- Free-field: En los lados del terreno, crea unas columnas invisibles a los lados que se mueven exactamente igual que el resto del terreno. Esto engaña a la onda,

haciéndole creer que el suelo continúa para siempre.

- Compliant base: En la base del modelo, permite que las ondas que viajan hacia abajo salgan del modelo y al mismo tiempo, permite que la energía entre desde abajo sin rebotar de vuelta hacia la roca profunda.
- None: La superficie (aire), cuando la onda llega al borde, rebota al 100% y regresa al centro.

3.8.4.2 Fases de análisis numérico

La secuencia de cálculo fue estructurada en tres etapas principales: generación del estado inicial de esfuerzos, simulación constructiva y análisis dinámico de carga vehicular.

1. **Etapa 1: Estado inicial de esfuerzos**

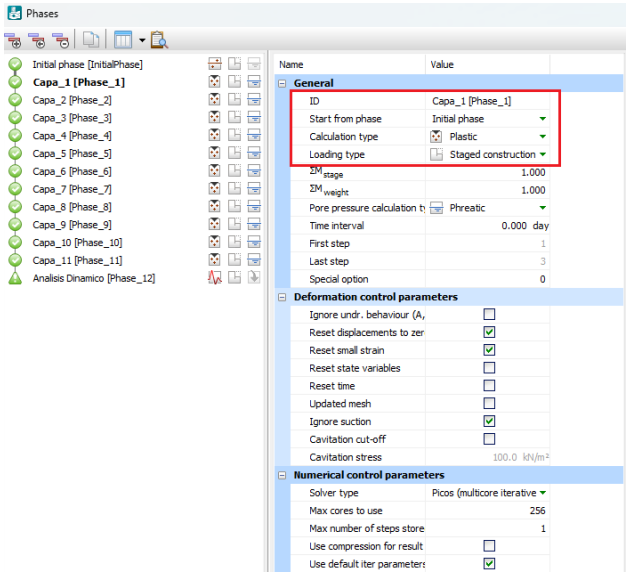
   La primera etapa consistió en la generación del estado inicial de esfuerzos geostáticos del terreno. En esta fase se estableció la distribución de tensiones debida al peso propio de los materiales presentes en el dominio de análisis.

2. **Etapa 2: Simulación constructiva**

   Una vez establecido el equilibrio geostático, se procedió a la construcción secuencial del modelo mediante la activación progresiva de los volúmenes que conforman el sistema suelo–estructura.

Figura 54

Fase estático en PLAXIS 3D, para muro de contención



Nota: Elaboración propia

3. **Etapa 3: Análisis dinámico transitorio**

   Finalizada la construcción del modelo, se generó una fase de análisis dinámico transitorio denominada "Análisis Dinámico", tomando como condición inicial el estado de esfuerzos y deformaciones alcanzado al término de la última fase constructiva.

   El análisis dinámico fue seleccionado debido a que las cargas vehiculares constituyen acciones móviles que generan variaciones temporales de esfuerzos y deformaciones en el relleno estructural. Este enfoque permite capturar la respuesta instantánea del sistema suelo–estructura durante el paso del vehículo.

   La duración total del análisis fue determinada en función de la longitud de la trayectoria recorrida por el vehículo y de la velocidad de circulación considerada en la simulación.

   La velocidad de desplazamiento adoptada fue de v=60 km/h equivalente a 16.67 m/s.

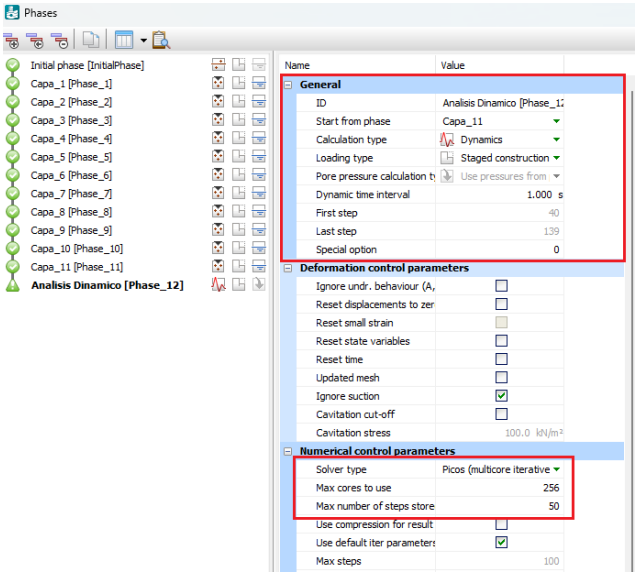
   La duración total del análisis dinámico fue calculada en función de la longitud del recorrido del vehículo dentro del modelo.

$$t_{total} = \frac{60km/h}{15m} \approx 1.00seg \tag{3.39}$$

   Obteniéndose un tiempo total aproximado de análisis de 1.00 segundo.

Figura 55

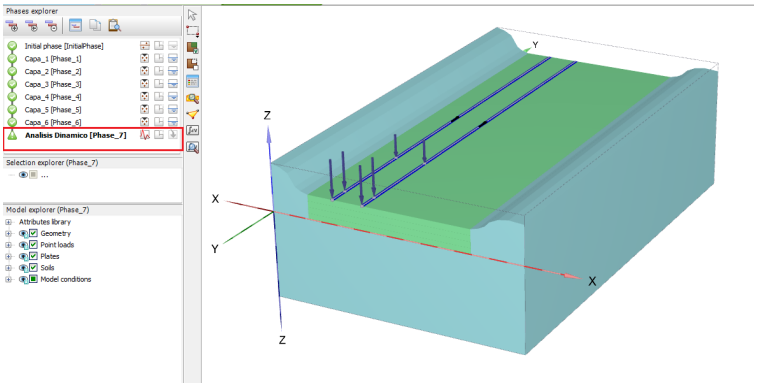
Fase dinámico en PLAXIS 3D, para muro de contención



Nota: Elaboración propia

Figura 56

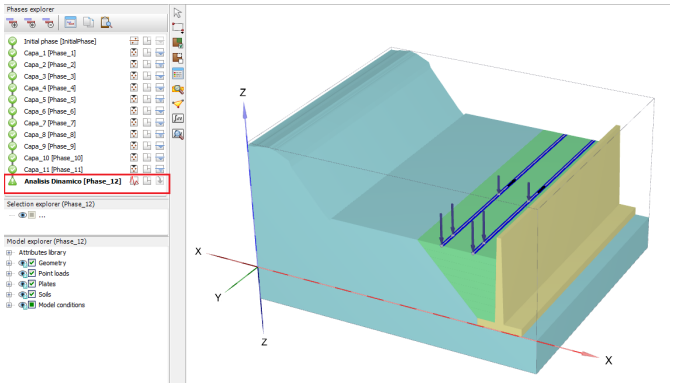
Stateg contruccion en PLAXIS 3D, para Terraplén



Nota: Elaboración propia

Figura 57

Stateg contruccion en PLAXIS 3D, para muro de contención



Nota: Elaboración propia

Criterio de evaluación

Las deformaciones obtenidas mediante el modelo numérico fueron analizadas en los puntos críticos del relleno estructural, particularmente en la superficie de rodadura y en la zona próxima al muro de contención.

Posteriormente, los resultados fueron comparados con los valores obtenidos mediante ensayos de campo (LWD), con el propósito de validar la capacidad predictiva del modelo numérico y verificar la representatividad de los parámetros geotécnicos utilizados en la simulación.

Las variable de salida:

- Asentamiento máximo (Uz)
- Esfuerzos efectivos
- Distribución espacial de deformaciones

Para cada fase se controlan los criterios de convergencia y estabilidad numérica:

3.8.5 Validación del modelo mediante el ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD)

La validación del modelo numérico se realizó mediante la simulación del ensayo de Deflectómetro de impacto ligero (light Weight Deflectometer LWD) en PLAXIS 3D. Para ello se reprodujeron en el modelo numérico con las mismas condiciones del ensayo ejecutado en campo, con el propósito de comparar las deformaciones obtenidas experimentalmente con las predichas por el modelo de elementos finitos.

Figura 58

Trabajos de campo para el ensayo LWD (Deflectómetro de impacto ligero)



Nota: Elaboración propia

El procedimiento consistió en modelar la geometría del sistema de ensayo de campo, con las condiciones de borde, las propiedades mecánicas del relleno estructural y la aplicación de la carga dinámica transmitida por la placa del LWD, manteniendo las mismas características empleadas durante la evaluación de campo. Asimismo, se consideró el diámetro de la placa, la magnitud de la fuerza aplicada y la zona de medición de las deformaciones, con el fin de garantizar la representatividad de la simulación.

Posteriormente, las deformaciones verticales obtenidas en PLAXIS 3D, fueron comparadas con las deflexiones medidas en campo mediante el ensayo LWD. La concordancia entre ambos conjuntos de datos permitió evaluar la capacidad del modelo numérico para reproducir el comportamiento mecánico del modelo de relleno estructural bajo cargas vehiculares. Finalmente, el grado de ajuste del modelo se cuantificó mediante indicadores estadísticos, tales como el error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE) y R^2 Coeficiente de determinación, con el objetivo de

determinar la precisión y confiabilidad de la simulación numérica.

Tabla 14

Resultados del ensayo de Deflectómetro de impacto ligero (LWD)

N° ensayo	Ubicación	fuerza (kN)	fuerza promedio (kN)	Presion (kN/m2)	Deflexión individual (mm)	Deflexión promedio (mm)	Modulo de rigidez de superficie de campo (Mpa)
1	a 0.5 m del muro (7+618)	9.127 9.099 9.131	**9.119**	**129.007**	0.446 0.442 0.431	**0.440**	125.8
2	a 1.5 m del muro (7+618)	9.210 9.193 9.192	**9.198**	**130.130**	0.563 0.443 0.449	**0.485**	125
3	a 3.3 m del muro (7+618)	9.115 9.087 9.180	**9.127**	**129.125**	0.517 0.440 0.426	**0.461**	128
4	a 1.5 m del muro (7+615)	9.205 9.229 9.209	**9.214**	**130.356**	0.316 0.315 0.322	**0.318**	176
5	a 3.3 m del muro (7+615	9.231 9.190 9.176	**9.199**	**130.139**	0.354 0.365 0.351	**0.357**	156.5
6	terraplen (7+620.00)	9.224 9.157 9.210	**9.197**	**130.111**	0.380 0.391 0.383	**0.385**	145
7	terraplen (7+620.00)	9.194 9.178 9.165	**9.179**	**129.856**	0.506 0.478 0.479	**0.488**	114.2
8	muro a 1.5 (1+050.00)	8.605 8.450 8.408	**8.488**	**120.076**	0.587 0.593 0.594	**0.591**	87.1
9	terraplen (1+650.00)	8.207 8.023 8.206	**8.145**	**115.233**	0.880 0.899 0.909	**0.896**	55.2
10	terraplen (1+650.00)	8.080 8.120 8.265	**8.155**	**115.370**	0.890 0.867 0.856	**0.871**	56.8

Nota: Anexo A1

Para el ensayo de campo LWD se aplicaran las mismas fuerzas en Plaxis 3D, y sobre una placa rigida de 0.30m de diametro.

Tabla 15

Parámetros de la placa

	Placa rígida D=0.30m	
Parametro	**Descripción**	**plate**
Model	Modelo del material (Model)	Lineal Elástico
γ	Peso unitario	77 kN/m^3
E_1	Modulo de elasticidad	$2.10e^6$ kN/m^2
v_{12}	Relación de poisson	0.30
d	grosor de la placa	0.02 m
G_{12}	Módulo de corte	$8.08e^8$ kN/m^2

Nota: Elaboración propia.

Tabla 16

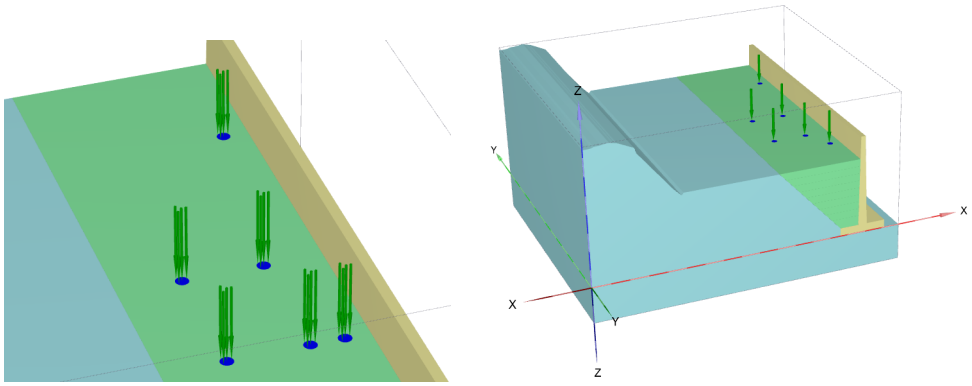
Cargas aplicadas en cada ensayo LWD en Plaxis 3D en relleno de trasdós de muro de contención

N Ensayo	Fuerza (kN)	Presión (kN/m2)
01	9.119	129.007
02	9.198	130.130
03	9.127	129.125
04	9.214	130.356
05	9.199	130.139
08	8.488	120.076

Nota: Elaboración propia.

Figura 59

Modelamiento del ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD) en trasdó de muro de contención Plaxis 3D



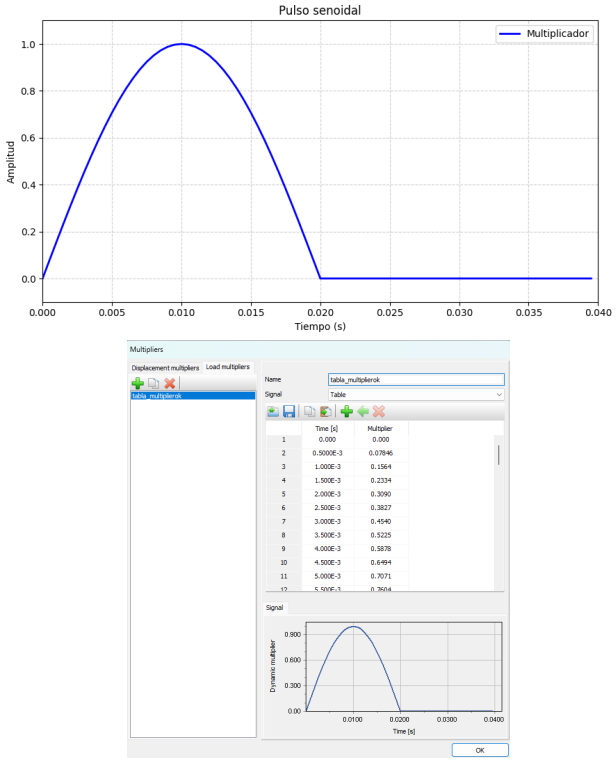
Nota: Elaboración propia

En el modelamiento numérico del ensayo LWD en PLAXIS 3D permitió reproducir la respuesta frente a una carga dinámica aplicada sobre una placa circular de 300 mm de diámetro. El ensayo LWD aplica una carga mediante la caída de una masa sobre un

sistema amortiguador. La fuerza desarrollada durante el impacto tiene una duración aproximado de 15 - 20 ms, lo cual coincide con el pulso definido en la figura 60.

Figura 60

Aplicación de la carga impulsiva sobre la placa circular en Plaxis 3D



Nota: Elaboración propia

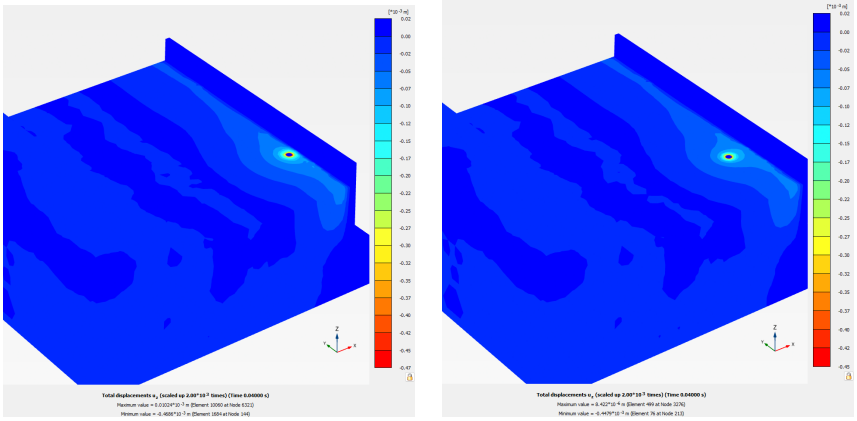
Las principales características son:

- Inicio del impacto (t = 0 s): El multiplicador es igual a 0, la placa aún no recibe carga.
- Fase de incremento (t=0–0.01 s): La carga aumenta progresivamente siguiendo una función seno, se evita una aplicación instantánea de la carga, reduciendo problemas numéricos y representando mejor el impacto físico.
- Carga máxima (t ≈ 0.01 s): El multiplicador alcanza el valor de 1.0., en este instante actúa la carga máxima del ensayo.

$$P(t) = P_{max} x Multiplicador(t) \tag{3.40}$$

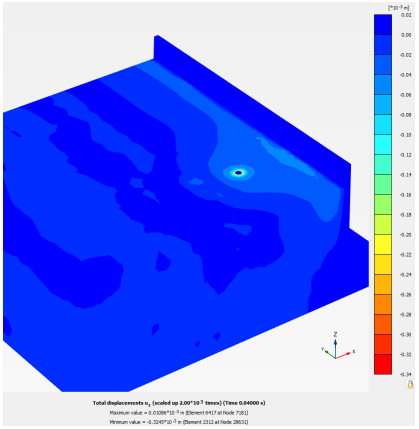
Figura 61

Resultados de los ensayos LWD en Plaxis 3D

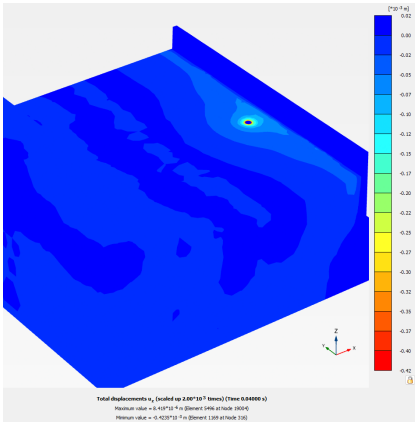


(a) *Ensayo lwd 01*

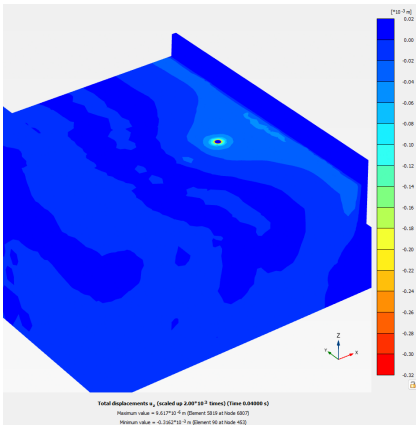
(b) *Ensayo lwd 02*



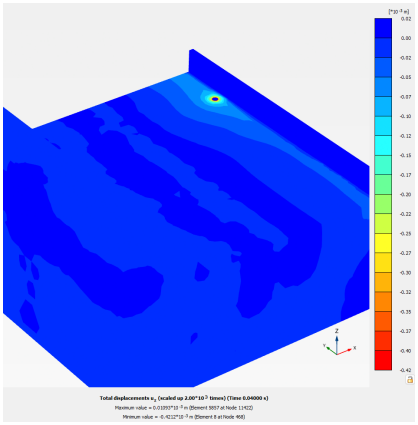
(c) *Ensayo lwd 03*



(d) *Ensayo lwd 04*



(e) *Ensayo lwd 05*



(f) *Ensayo lwd 06*

Nota: Elaboración propia

Comportamiento del suelo:

- El incremento progresivo de la carga genera una onda de compresión que se

propaga desde la placa hacia el relleno estructural;

- La deformación máxima ocurre muy cerca del instante en que la carga alcanza su valor máximo, dependiendo de la rigidez y amortiguamiento del suelo;
- Una vez retirada la carga, el suelo experimenta una recuperación elástica parcial y las vibraciones remanentes se atenúan progresivamente por amortiguamiento interno.

Comparación de los asentamiento obtenidos del modelo numérico en Plaxis 3D con los asentamiento obtenidos del ensayo de campo.

Tabla 17

Comparación con el ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD)

ensayo	δ_{LWD} **(mm)**	δ_{PLAXIS} **(mm)**
1	0.440	0.4686
2	0.446	0.4479
3	0.318	0.3245
4	0.433	0.4235
5	0.357	0.3162
6	0.591	0.3273
7	0.896	0.3375
8	0.385	0.4212
9	0.871	0.3474
10	0.488	0.3122

Nota: Elaboración propia.

De la tabla 17, se usarán todos los valores correspondientes al relleno en trasdós de muro de contención:

Tabla 18

Datos analizados

ensayo	δ_{LWD} **(mm)**	δ_{PLAXIS} **(mm)**	**Error (PLAXIS - LWD) (mm)**	**Error (%)**
1	0.440	0.4686	-0.0289	6.57%
2	0.446	0.4479	-0.0019	0.43 %
3	0.318	0.3245	-0.0065	2.04%
4	0.433	0.4235	0.0095	2.19 %
5	0.357	0.3162	0.0405	11.35%
8	0.385	0.4212	-0.0365	9.49%

Nota: Elaboración propia.

Indicadores estadisticos

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(P_i - Q_i)^2}{n}} = 0.0256mm \tag{3.41}$$

Error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|P_i - Q_i|}{n} = 0.0206mm \tag{3.42}$$

Error porcentual absoluto medio (MAPE):

$$MAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|P_i - Q_i|}{Qi} = 5.35\%mm \tag{3.43}$$

Coeficiente de determinación (R^2):

$$R^2 = 0.8242 \tag{3.44}$$

Tabla 19
Indicadores estadisticos

Indicador	Valor	Interpretación
RMSE	0.0256 mm	El RMSE es ligeramente superior al MAE, lo que indica que existen algunas diferencias puntuales entre los valores medidos y simulados.
MAE	0.0206 mm	Este error absoluto es bajo y evidencia una buena aproximación del modelo numérico
MAPE	5.35 %	El error relativo promedio del modelo es del 5.77 %. Este valor indica que las predicciones de PLAXIS presentan una desviación porcentual baja respecto a las mediciones experimentales.

Nota: Elaboración propia.

Regresión lineal:

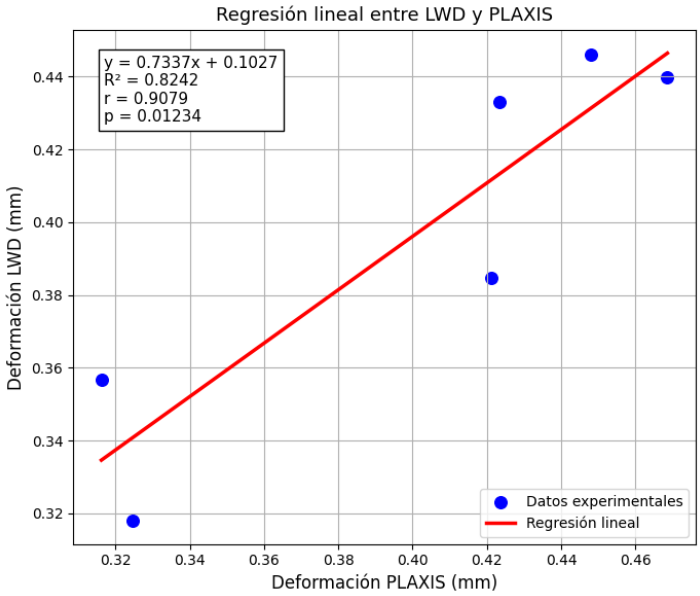
La ecuación de regresión obtenida es:

$$\delta_{LWD} = 0.7337\delta_{PLAXIS} + 0.1027 \tag{3.45}$$

Esta ecuación representa la relación existente entre las deflexioness simuladas y las medidas en campo.

Figura 62

Grafico de regresión lineal



Nota: Elaboración propia

La pendiente positiva indica que existe una tendencia consistente entre ambas variables. Con los resultados obtenidos de los indicadores estadisticos del coeficiente de determinación (R^2) nos da un valor de 0.8242 el cual es considerado aceptable, obtuvimos un error porcentual absoluto medio (MAPE) menor al 10% y los valores de RMSE y MAE son próximos a cero. En cumplimiento de estos criterios indica que el modelo reproduce adecuadamente la respuesta deformacional observada en campo.

La ecuación de regresión como función de corrección:

$$\delta_{Corregida} = 0.7337\delta_{PLAXIS} + 0.1027 \tag{3.46}$$

Con la ecuación obtenida se podra extrapolar los resultados al análisis de cargas vehiculares.

Una vez calibrado el modelo mediante el ensayo LWD, los mismo parámetros Hardening

Soil se emplean en el análisis de cargas vehiculares (mucho mayores que la carga LWD). Los resultados obtenidos se pueden corregir con la función de correción.

3.8.6 Modelamiento Númerico en PLAXIS 3D para un análisis paramétrico

El análisis de sensibilidad se desarrolla mediante el método One-at-a-Time (OAT), variando individualmente los parámetros constitutivos del modelo Hardening Soil en intervalos de $\mp$ 10%, $\mp$ 20% y $\mp$ 30% respecto al modelo base calibrado. Para cada iteración se recalculó el modelo numérico en PLAXIS 3D y se registraron los asentamientos máximos obtenidos en el relleno estructural. Posteriormente se construyeron curvas de sensibilidad e índices de sensibilidad relativa para identificar los parámetros geotécnicos con mayor influencia sobre la respuesta deformacional del sistema.

1. Definición del modelo base calibrado.
2. Selección de parámetros críticos.
3. Definición del rango de variación
4. Ejecución numérica
5. Construcción de curvas de sensibilidad

Para cada combinación de parámetros se generó una nueva fase de cálculo, ejecutándose automáticamente las simulaciones y extrayéndose los asentamientos máximos del terreno.

El análisis de sensibilidad geotécnico es el siguiente paso lógico después del análisis parámetrico de PLAXIS 3D. Aquí ya no solo se verá los resultados, sino que también cuantificará qué variable influye más en los asentamientos.

- **Análisis de Sensibilidad del Módulo de elasticidad (E_{50}^{ref})**

Tabla 20

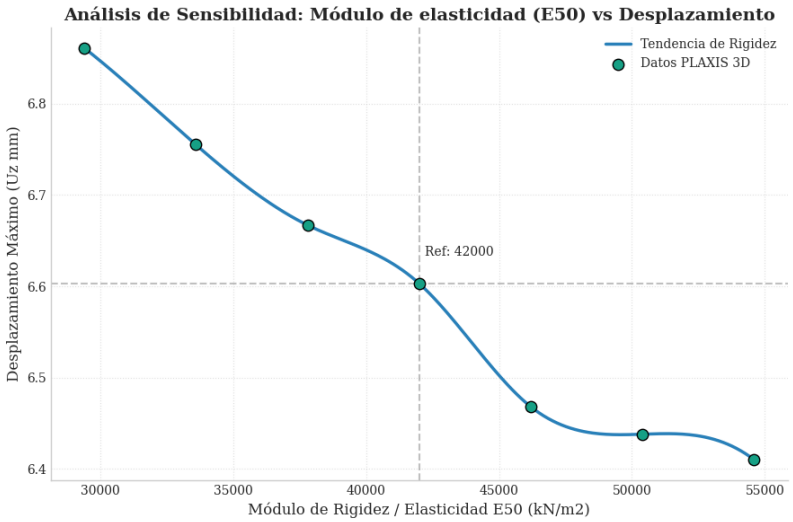
Rangos de variación

Porcentaje de Variación	Módulo de elasticidad ($kN/m2$)	U_z^{max} m
-30%	29.40e3	$6.861x10^{-3}$
-20%	33.60e3	$6.755x10^{-3}$
-10%	37.80e3	$6.667x10^{-3}$
0%	42.0e3	$6.603x10^{-3}$
10%	46.20e3	$6.468x10^{-3}$
20%	50.40e3	$6.468x10^{-3}$
30%	54.60e3	$6.410x10^{-3}$

Nota: Elaboración propia.

Figura 63

Asentamiento vs Rigidez (kN/m2)



Nota: Elaboración propia

- **Análisis de Sensibilidad Ángulo de Fricción (ϕ)**

Tabla 21

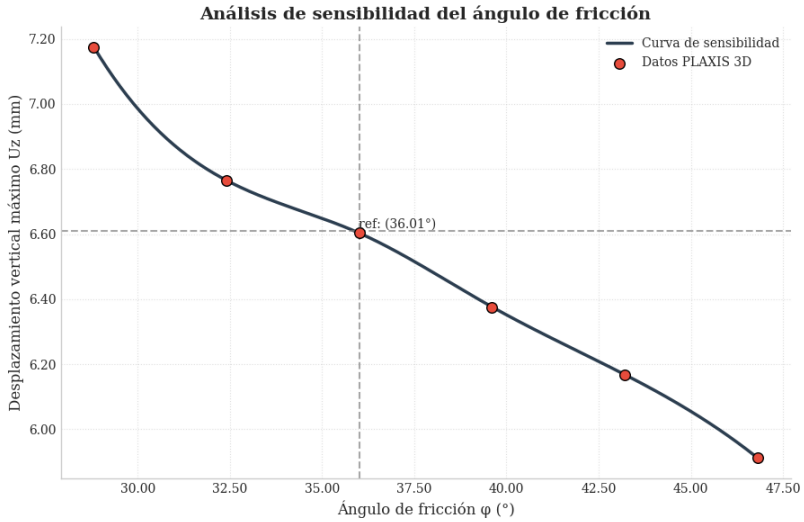
Rangos de variación

Porcentaje de Variación	Ángulo de fricción	U_z^{max} mm
-30%	$25.21°$	-
-20%	$28.81°$	$7.175x10^{-3}$
-10%	$32.41°$	$6.765x10^{-3}$
0%	$36,01°$	$6.603x10^{-3}$
10%	$39.61°$	$6.376x10^{-3}$
20%	$43.21°$	$6.168x10^{-3}$
30%	$46.81°$	$5.912x10^{-3}$

Nota: Elaboración propia.

Figura 64

Asentamiento vs Ángulo de fricción ϕ



Nota: Elaboración propia

- **Análisis de Sensibilidad Ángulo de dilatancia (ψ)**

Tabla 22

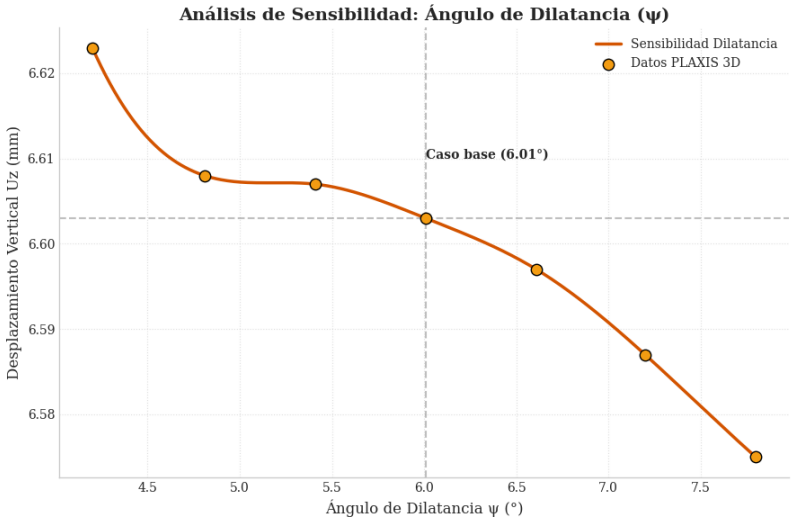
Rangos de variación

Porcentaje de Variación	Ángulo de dilatancia	U_z^{max} mm
-30%	4.21°	$6.623x10^{-3}$
-20%	4.81°	$6.608x10^{-3}$
-10%	5.41°	$6.607x10^{-3}$
0%	6.01°	$6.603x10^{-3}$
10%	6.61°	$6.597x10^{-3}$
20%	7.21°	$6.587x10^{-3}$
30%	7.81°	$6.575x10^{-3}$

Fuente: Elaboración propia.

Figura 65

Asentamiento vs Ángulo de dilatancia ψ°



Nota: Elaboración propia

Capítulo IV

Resultados

En esta capítulo se muestra los resultados obtenidos del análisis numérico calculados con Método de Elementos Finitos (MEF).

4.1 Análisis de resultados

El análisis numérico desarrollado mediante el método de elementos finitos en PLAXIS 3D permitió obtener la distribución de desplazamiento totales en el modelo tridimensional del relleno estructural.

4.1.1 Hipótesis general

De la hipótesis general establece que mediante el análisis numerico computacional podemos estimar las deformaciones producto de las cargas vehiculares sobre los rellenos estructurales en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.

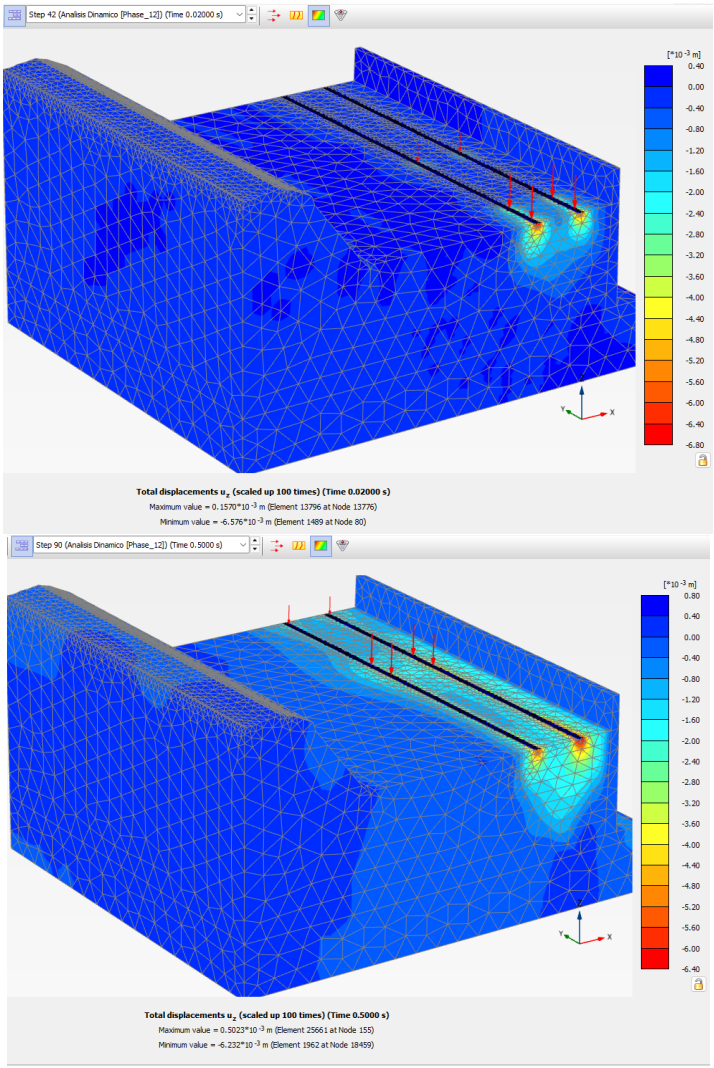
Para sustentar esta afirmación, se empleo el método de elementos finitos (MEF) como herramienta principal de análisis, el cual permite simular el comportamiento mecánico del sistema suelo-estructura bajo diferentes condiciones de carga.

4.2 Constrastación de la hipótesis

EL modelo numérico desarrollado reproduce adecuadamente la geometría del problema, las condiciones de frontera y las propiedades mecánicas de los materiales que conforman el relleno estructural y el terreno natural. La discretización mediante una malla tridimensional permite capturar la variación espacial de esfuerzos y deformaciones, tal como se observan en la figura 66 la distribución de esfuerzos efectivos, donde se identifican

Figura 66

Modelo del muro de contención en Plaxis 3D



Nota: Elaboración propia

En las imagenes mostradas corresponden a dos instantes del análisis dinámico, donde se observa la evolución de los desplazamienos verticales (Uz) inducidos por el paso de la caga vehicular.

- Las deformaciones se concentran en la zona de influencia directa de la carga, coherente con la teoría de distribución de esfuerzos de Boussinesq, 1885.
- El comportamiento del telleno responde a un modelo elastoplástico, consistente con modelos como: Hardening Soil y Mohr Coulomb.

Los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos permiten estimar la distribución, magnitud y evolución temporal de las deformaciones producidas por las

cargas vehiculares en los rellenos estructurales. Además la validación experimental realizada con el ensayo LWD mostró una buena correspondencia entre los valores medidos y los calculados, respaldada por los indicadores estadísticos obtenidos.

En consecuencia, se acepta la hipótesis general, concluyendo que el análisis numérico computacional implementado en PLAXIS 3D constituye una herramienta confiable para estimar las deformaciones inducidas por las cargas vehiculares en rellenos estructurales, representando adecuadamente el comportamiento deformacional del sistema analizado.

4.2.1 Hipótesis Específico 01

De la hipótesis específica 01 establece que: A través del método de elementos finitos podemos estimar las deformaciones en los rellenos estructurales para la conformación de terraplenes producto de las cargas vehiculares en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho..

Para sustentar esta afirmación, se empleo el método de elementos finitos (MEF) como herramienta principal de análisis.

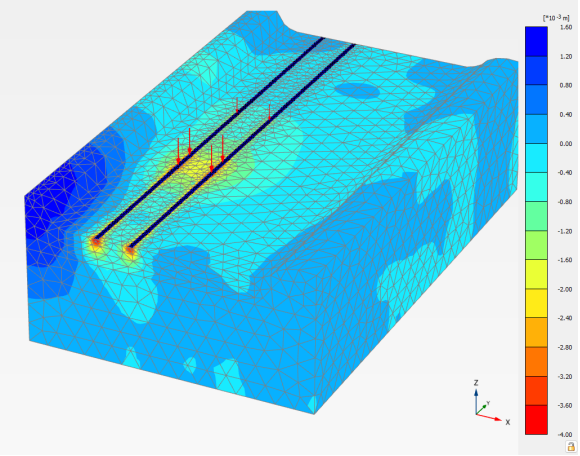
1. **Asentamientos**

   A) Respuesta de los rellenos en terraplenes ante cargas vehiculares

   En el caso del relleno en terraplenes, se identifican deformaciones verticales debido a la carga vehicular. En la figura 67, se observa el modelo numérico en PLAXIS 3D de relleno estructural en terraplén ante cargas vehiculares.

Figura 67

Asentamientos en una Vista en 3D del modelo

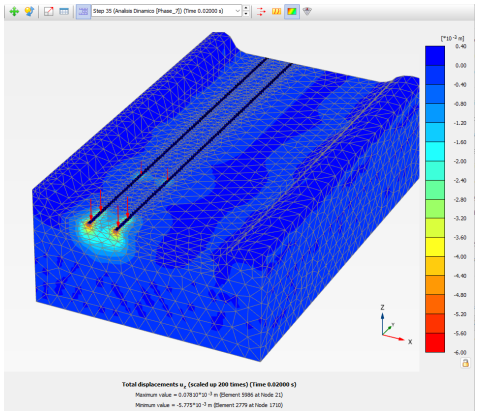


Nota: Elaboración propia

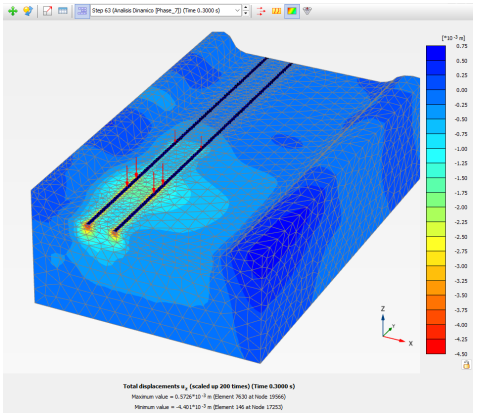
En la figura 68, se observa la evolucion de los desplazamientos verticales (Uz), obtenido mediante el análisis dinámico desarrollado en PLAXIS 3D durante el desplazamiento de la carga vehicular sobre la superficie del terraplén.

Figura 68

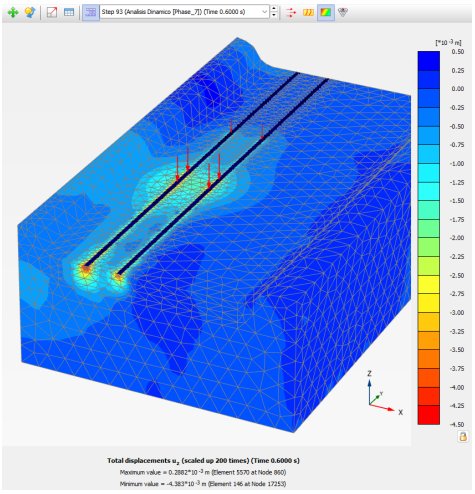
Simulación del transito de la carga vehicular en terraplenes para v= 60 km/h PLAXIS 3D



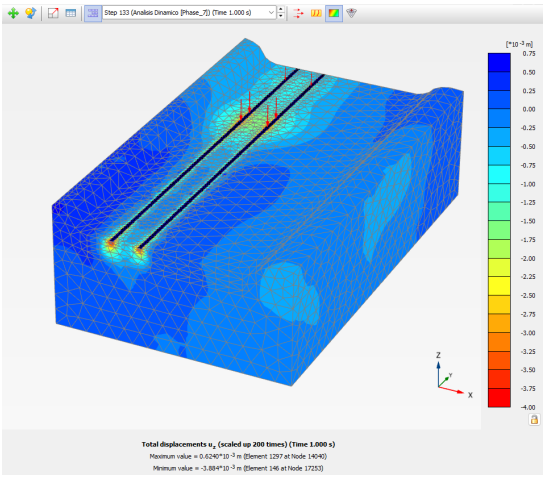
(a) *t=0.02 seg*



(b) *t=0.30 seg*



(c) *t=0.60 seg*



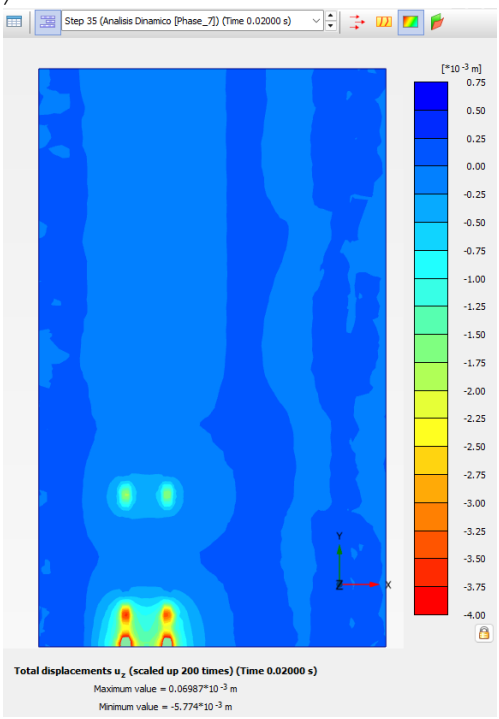
(d) *t=1.00 seg*

Nota: Elaboración propia

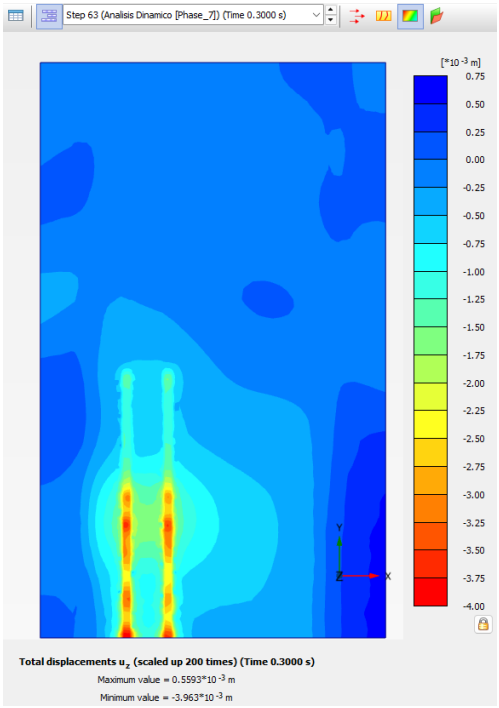
La respuesta deformacional fue evalua entre 0.2 y 1.00 seg. permitiendo identificar la propagación espacial y temporal de los asentamientos inducidos por el tránsito vehicular.

Figura 69

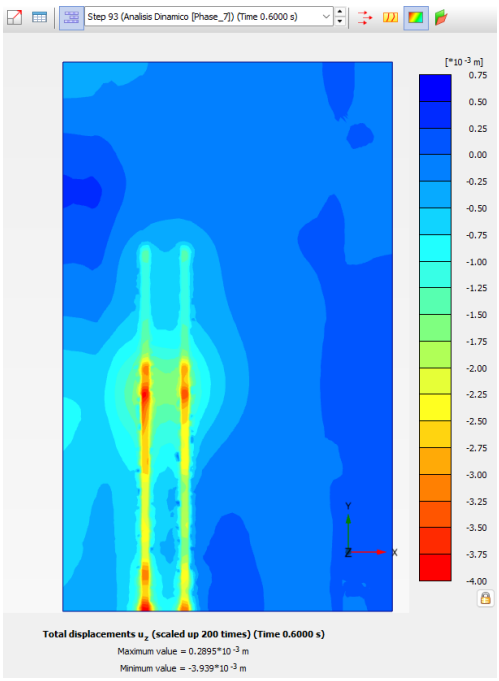
Vista en planta, simulación del transito de la carga vehicular en terraplenes para v= 60 km/h PLAXIS 3D



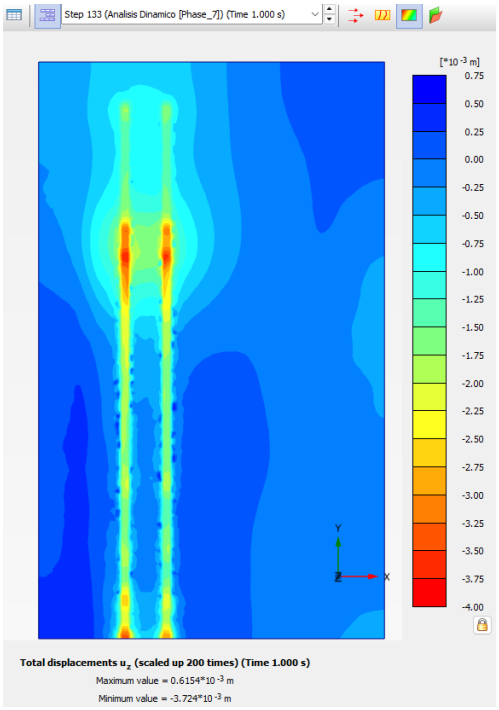
(a) *t=0.02 seg*



(b) *t=0.30 seg*



(c) *t=0.60 seg*



(d) *t=1.00 seg*

Nota: Elaboración propia

Los resultados obtenidos mediante el análisis dinámico (figura 69) evidencian que la respuesta deformacional del terraplén no corresponde a un proceso estático, sino a un fenómeno transitorio gobernado por la interacción entre la carga móvil, la rigidez del relleno estructural y la propagación de esfuerzos dentro del medio granular. El modelo dinámico desarrollado permitió reproducir la salida continua del bulbo de esfuerzos conforme avanza el vehículo, representando de manera más realista en las condiciones de servicio de una infraestructura vial.

La propagación longitudinal del bulbo de deformación demuestra que la respuesta del relleno no depende únicamente de la carga instantánea aplicada sobre la rueda, sino también de la interacción dinámica entre la velocidad del vehículo, la rigidez del material y la propagación de esfuerzos en el medio granular. Este comportamiento confirma la naturaleza transitoria del fenómeno.

B) Evolución temporal del asentamiento máximo

La tabla 23, muestra la evolución temporal del desplazamiento vertical máximo obtenido durante el análisis dinámico.

C) Análisis de la Validación del modelo

La aplicación de la función de corrección (3.8.5) permitió reducir la diferencia entre los resultados numéricos y los obtenidos mediante el ensayo LWD, incrementando la representatividad del modelo y disminuyendo el error sistemático asociado a la simulación numérica. Además se uso los mismos parámetros Hardening Soil usados para la calibración y validación del ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD) en el modelo de relleno en terraplén.

$$\delta_{Corregida} = 0.7337 * \delta_{PLAXIS} + 0.1027 \tag{4.1}$$

Tabla 23

evolución temporal de asentamiento máximos

N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)				N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)			
		30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h			30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h
1	0.020	6.678	6.369	6.066	5.775	26	0.520	5.030	4.523	4.208	3.979
2	0.040	8.284	7.744	7.219	6.739	27	0.540	5.127	4.628	4.321	4.095
3	0.060	8.656	7.933	7.332	6.986	28	0.560	5.214	4.735	4.433	4.205
4	0.080	8.475	7.793	7.446	7.133	29	0.580	5.259	4.805	4.513	4.283
5	0.100	8.196	7.722	7.358	6.998	30	0.600	5.304	4.872	4.603	4.383
6	0.120	7.752	7.284	6.865	6.448	31	0.620	5.246	4.818	4.559	4.354
7	0.140	7.224	6.704	6.218	5.743	32	0.640	5.127	4.708	4.457	4.260
8	0.160	6.795	6.198	5.642	5.150	33	0.660	4.920	4.514	4.265	4.071
9	0.180	6.501	5.844	5.268	4.790	34	0.680	4.681	4.286	4.035	3.921
10	0.200	6.132	5.447	4.879	4.393	35	0.700	4.512	4.135	3.959	3.891
11	0.220	5.765	5.077	4.542	4.067	36	0.720	4.446	4.078	3.847	3.863
12	0.240	5.555	4.884	4.364	3.923	37	0.740	4.488	4.128	3.912	3.800
13	0.260	5.575	4.916	4.404	3.981	38	0.760	4.604	4.264	4.058	3.878
14	0.280	5.728	5.072	4.569	4.164	39	0.780	4.816	4.492	4.291	4.107
15	0.300	5.935	5.276	4.788	4.401	40	0.800	4.998	4.682	4.481	4.292
16	0.320	6.159	5.498	5.018	4.646	41	0.820	5.111	4.793	4.596	4.417
17	0.340	6.300	5.639	5.171	4.807	42	0.840	5.111	4.794	4.596	4.416
18	0.360	6.272	5.623	5.165	4.809	43	0.860	4.987	4.680	4.479	4.299
19	0.380	6.025	5.391	4.941	4.601	44	0.880	4.808	4.517	4.312	4.129
20	0.400	5.674	5.056	4.622	4.319	45	0.900	4.645	4.362	4.161	4.130
21	0.420	5.232	4.634	4.224	4.119	46	0.920	4.520	4.243	4.053	4.179
22	0.440	4.836	4.260	3.877	3.784	47	0.940	4.545	4.268	4.080	4.033
23	0.460	4.649	4.090	3.731	3.469	48	0.960	4.544	4.270	4.083	3.973
24	0.480	4.790	4.252	3.907	3.660	49	0.980	4.476	4.207	4.026	3.844
25	0.500	4.981	4.465	4.135	3.894	50	1.000	4.484	4.235	4.060	3.884

Nota: Elaboración propia.

Tabla 24

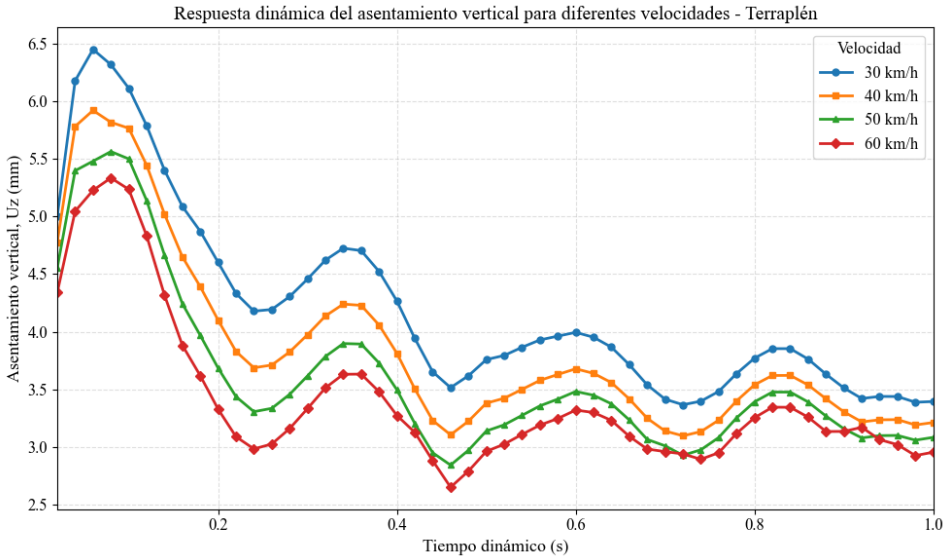
Evolución temporal de asentamiento máximos corregidos

N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)				N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)			
		30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h			30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h
1	0.020	5.003	4.776	4.553	4.340	26	0.520	3.793	3.421	3.190	3.022
2	0.040	6.181	5.784	5.399	5.047	27	0.540	3.864	3.498	3.273	3.107
3	0.060	6.453	5.923	5.482	5.228	28	0.560	3.928	3.577	3.355	3.188
4	0.080	6.321	5.820	5.565	5.336	29	0.580	3.961	3.628	3.414	3.245
5	0.100	6.116	5.768	5.502	5.237	30	0.600	3.994	3.677	3.480	3.319
6	0.120	5.791	5.447	5.140	4.834	31	0.620	3.952	3.638	3.447	3.297
7	0.140	5.403	5.021	4.665	4.316	32	0.640	3.865	3.557	3.372	3.228
8	0.160	5.088	4.650	4.243	3.881	33	0.660	3.712	3.415	3.232	3.090
9	0.180	4.872	4.391	3.967	3.617	34	0.680	3.537	3.247	3.063	2.980
10	0.200	4.602	4.099	3.683	3.326	35	0.700	3.413	3.136	3.007	2.958
11	0.220	4.332	3.828	3.435	3.087	36	0.720	3.365	3.094	2.925	2.937
12	0.240	4.178	3.686	3.305	2.981	37	0.740	3.396	3.131	2.973	2.891
13	0.260	4.193	3.710	3.334	3.024	38	0.760	3.480	3.231	3.080	2.948
14	0.280	4.305	3.824	3.455	3.158	39	0.780	3.636	3.399	3.251	3.116
15	0.300	4.457	3.974	3.616	3.332	40	0.800	3.769	3.538	3.390	3.252
16	0.320	4.622	4.136	3.784	3.511	41	0.820	3.852	3.619	3.475	3.343
17	0.340	4.725	4.240	3.897	3.630	42	0.840	3.852	3.620	3.475	3.343
18	0.360	4.704	4.229	3.892	3.631	43	0.860	3.762	3.536	3.389	3.257
19	0.380	4.523	4.058	3.728	3.478	44	0.880	3.630	3.417	3.266	3.132
20	0.400	4.266	3.812	3.494	3.272	45	0.900	3.511	3.303	3.156	3.133
21	0.420	3.941	3.502	3.202	3.125	46	0.920	3.419	3.216	3.077	3.169
22	0.440	3.651	3.228	2.948	2.879	47	0.940	3.437	3.234	3.096	3.062
23	0.460	3.514	3.104	2.840	2.648	48	0.960	3.436	3.236	3.098	3.018
24	0.480	3.617	3.222	2.969	2.788	49	0.980	3.387	3.189	3.057	2.923
25	0.500	3.757	3.379	3.137	2.960	50	1.000	3.393	3.210	3.081	2.952

Nota: Elaboración propia.

Figura 70

Evolución temporal del desplazamiento vertical (Uz)



Nota: Elaboración propia

La Figura 70 muestra la evolución temporal del asentamiento vertical máximo (Uz) del terraplén para velocidades de 30, 40, 50 y 60 km/h. En todos los casos se observa una respuesta dinámica similar, caracterizada por un incremento rápido del asentamiento durante los primeros 0.08–0.10 s, seguido por una disminución progresiva y posteriormente un comportamiento oscilatorio amortiguado hasta alcanzar una condición prácticamente estable alrededor de 0.80–1.00 s.

Los mayores asentamientos corresponden a la velocidad de 30 km/h, alcanzando aproximadamente 6.45 mm, mientras que para 40 km/h, 50 km/h y 60 km/h los valores máximos disminuyen hasta aproximadamente 5.92 mm, 5.55 mm y 5.34 mm, respectivamente. Esta tendencia evidencia que el incremento de la velocidad reduce el tiempo efectivo de interacción entre la carga y el terreno, disminuyendo la magnitud del asentamiento.

Al incrementar la velocidad de 30 km/h a 60 km/h el asentamiento máximo disminuyó aproximadamente de 6.45 mm a 5.34 mm, equivalente a una reducción cercana al 17 %, evidenciando una menor interacción temporal entre la carga y el terreno.

D) Contrastación de la hipótesis

La tendencia observada en esta investigación coincide con el estudio de Yong Deng et al., 2019 titulado "3D simulation of deflection basin of pavements under high-speed moving loads", concluye que la respuesta del terreno dependente de la interacción entre la velocidad de circulación, la rigidez del suelo y la propagación tridimensional de los esfuerzos. En ambos estudios se observa que el bulbo de deformación se desplaza siguiendo la trayectoria del vehículo y que la máxima respuesta ocurre cuando la carga actúa directamene sobre la zona analizada.

Ademas el comportamiento coincide con lo reportado por El Koufachy et al., 2025 titulado "3D Modelling of Pavement Deflections Considering the Variations in Temperatures, Moving Vehicle Speeds, and Axle Loads" y por Wu and Shen, 1996 en su invesigación titulado: "Dynamic Analysis of Concrete Pavements Subjected to Moving Loads", demuestra que la velocidad del vehículo modifica la respuesta dinámica del pavimento y del suelo, alterando tanto la magnitud de las deflexiones como la distribución espacial de los esfuerzos. De manera similar, en la presenta investigación se comprobó que el incremento de la velocidad reduce el tiempo efectivo de aplicación de la carga sobre el relleno, disminuyendo los asentamientos máximos y modificando la evolución temporal de las deformaciones.

Los asentamientos obtenidos mediante PLAXIS 3D presentan un comportamiento similar al reportado en investigaciones desarrolladas mediante modelos bidimensionales, confirmando la capacidad del método de elementos finitos para reproducir el comportamiento deformacional del suelo. (Razak, Mukri and Kasim, 2017)

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo desarrollado en PLAXIS 3D permitió estimar la distribución espacial y temporal de los asentamientos inducidos por cargas vehiculares en terraplenes. Asimismo, la validación con el ensayo LWD y la concordancia con estudios internacionales evidencian que el objetivo específico N.° 1 fue alcanzado satisfactoriamente.

4.2.2 Hipótesis Específico 02

De la hipótesis específica 02 establece que: A través del método de elementos finitos podemos estimar las deformaciones en los rellenos estructurales en trasdos de los muros de contención producto de las cargas vehiculares en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.

Para sustentar esta afirmación, se empleo el método de elementos finitos (MEF) como herramienta principal de análisis.

1. **Asentamientos**

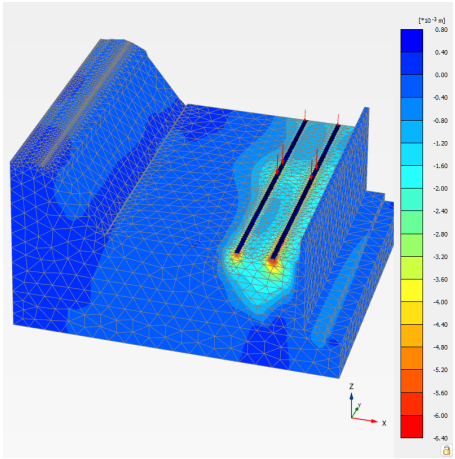
   A) Respuesta de los rellenos estructurales en trasdós de muros de contención ante cargas vehiculares

   Los resultados obtenidos mediante el análisis numérico evidencian un comportamiento coherente con los principios de la mecánica de suelos y con estudios previos desarrollados en el campo del método de elementos finitos aplicado a problemas geotécnicos.

   En el caso del relleno ubicado detrás del muro de contención, se identifican deformaciones verticales.

Figura 71

Asentamientos en una Vista en 3D del modelo



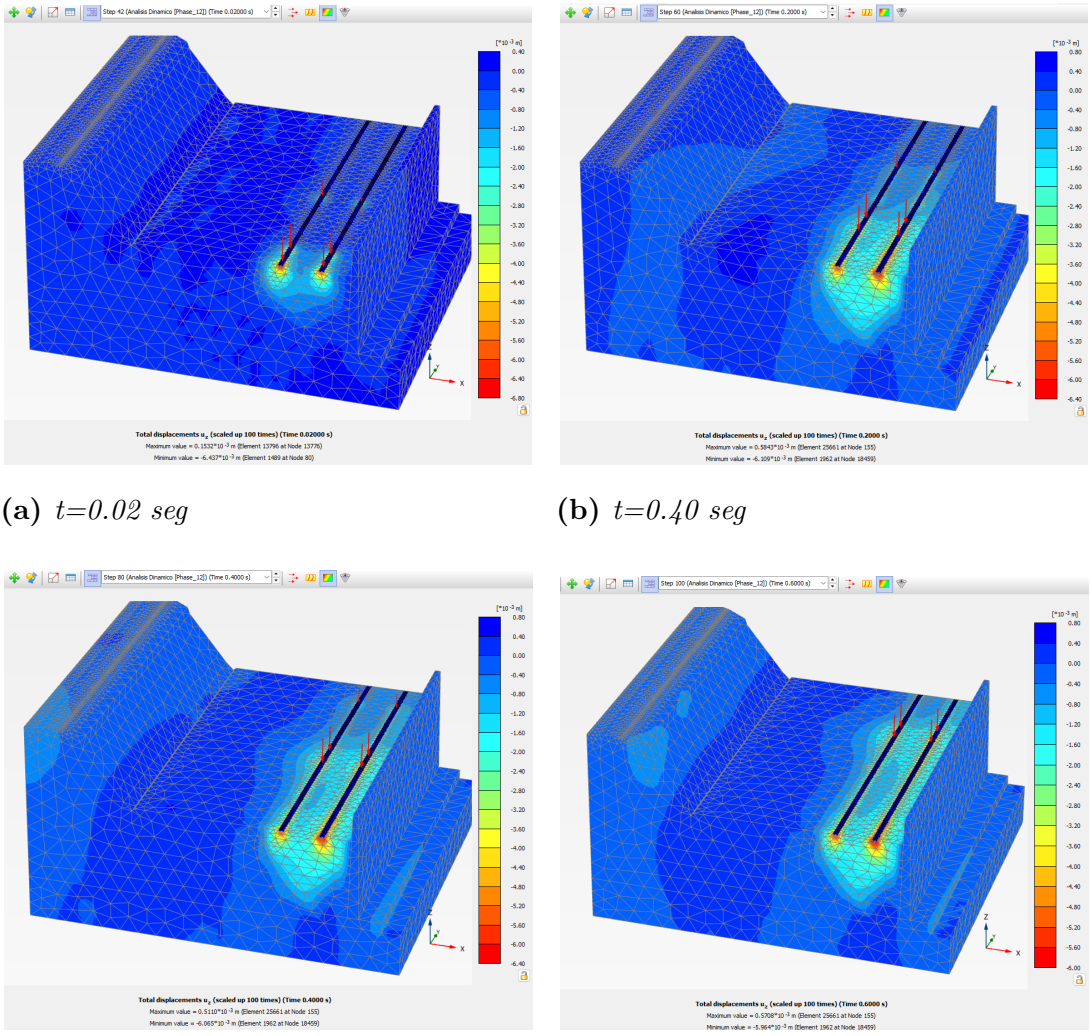
Nota: Elaboración propia

En la figura 72, se observa la evolucion de los desplazamientos verticales (Uz), obtenido mediante el análisis dinámico desarrollado en PLAXIS 3D durante el

desplazamiento de la carga vehicular sobre la superficie del relleno estructural ubicado en trasdós de muro de contención.

Figura 72

Simulación del transito de la carga vehicular en trasdós de muro de contención para v= 60 km/h PLAXIS 3D



(a) *t=0.02 seg* **(b)** *t=0.40 seg*

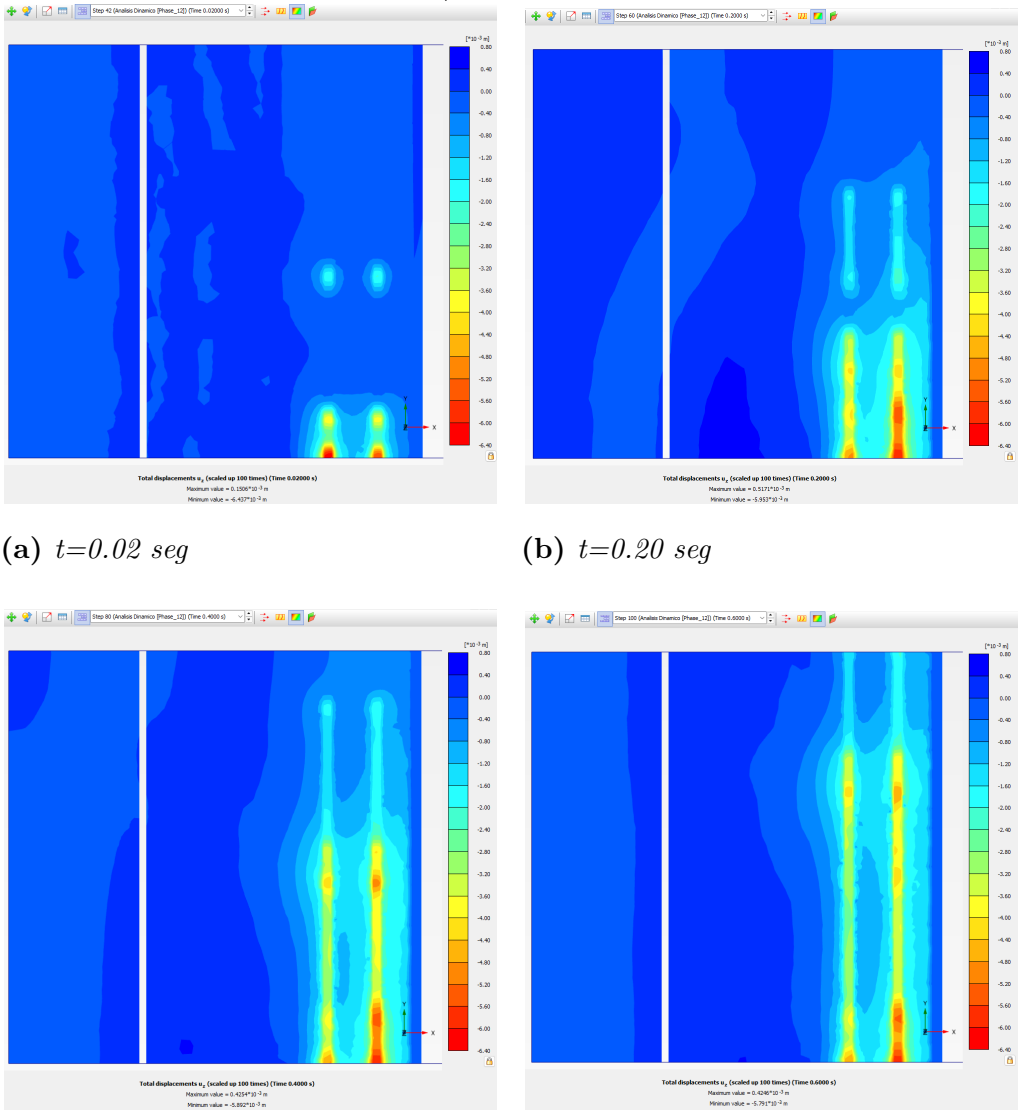
(c) *t=0.60 seg* **(d)** *t=0.80 seg*

Nota: Elaboración propia

La respuesta deformacional fue evalua entre 0.2 y 1.00 seg. permitiendo identificar la propagación espacial y temporal de los asentamientos inducidos por el tránsito vehicular.

Figura 73

Vista en planta, simulación del transito de la carga vehicular en rellenos en trasdós de muro de contención para v= 60 km/h PLAXIS 3D



(a) *t=0.02 seg* **(b)** *t=0.20 seg*

(c) *t=0.50 seg* **(d)** *t=0.80 seg*

Nota: Elaboración propia

Los resultados obtenidos mediante el análisis dinámico tridimensional muestran que el comportamiento deformacional del relleno ubicado en trasdós del muro de contención presenta características significativamente diferentes a las observadas en los terraplenes, el cual se debe principalmente al efecto de confinamiento lateral impuesto por el muro, el cual modifica la trayectoria de propagación de esfuerzos y condiciona la redistribución de las deformaciones dentro del relleno estructural. (figura 73)

Desde el punto de vista de la mecánica de suelos, este comportamiento demuestra que el relleno trabaja bajo un estado de deformación tridimensional parcialmente restringido, donde el confinamiento lateral incrementa la rigidez aparente del material, como consecuencia una mayor proporción de la energía inducida por las cargas vehiculares se transmite hacia capas más profundas en lugar de disiparse mediante deformaciones laterales.

En consecuencia, la interacción entre el relleno y le muro modifica significativamente la distribución espacial de esfuerzos respecto a un terraplén sin elementos de contención.

B) Evolución temporal del asentamiento máximo

La tabla 25, muestra la evolución temporal del desplazamiento vertical máximo obtenido durante todo el análisis dinámico.

Tabla 25

evolución temporal de asentamiento máximos

N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)				N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)			
		30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h			30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h
1	0.020	7.454	7.107	6.763	6.437	26	0.520	7.225	6.804	6.426	6.020
2	0.040	8.657	7.986	7.329	6.796	27	0.540	7.237	6.814	6.433	6.029
3	0.060	8.860	8.098	7.370	6.859	28	0.560	7.242	6.828	6.451	6.038
4	0.080	8.776	7.962	7.458	7.036	29	0.580	7.204	6.790	6.422	5.967
5	0.100	8.220	7.661	7.272	6.973	30	0.600	7.208	6.799	6.430	5.964
6	0.120	7.948	7.521	7.129	6.695	31	0.620	7.217	6.804	6.429	5.982
7	0.140	7.702	7.272	6.871	6.441	32	0.640	7.151	6.744	6.372	5.952
8	0.160	7.521	7.083	6.685	6.250	33	0.660	7.111	6.704	6.331	5.943
9	0.180	7.404	6.965	6.568	6.139	34	0.680	7.092	6.691	6.285	5.941
10	0.200	7.377	6.940	6.540	6.109	35	0.700	7.089	6.696	6.266	5.931
11	0.220	7.450	7.013	6.614	6.184	36	0.720	7.124	6.734	6.315	5.959
12	0.240	7.548	7.111	6.710	6.276	37	0.740	7.181	6.786	6.393	6.010
13	0.260	7.594	7.156	6.449	6.321	38	0.760	7.213	6.809	6.445	6.023
14	0.280	7.583	7.139	6.735	6.306	39	0.780	7.226	6.821	6.476	6.037
15	0.300	7.523	7.081	6.677	6.251	40	0.800	7.177	6.784	6.425	6.005
16	0.320	7.436	6.994	6.596	6.174	41	0.820	7.084	6.687	6.323	5.929
17	0.340	7.358	6.917	6.522	6.104	42	0.840	6.897	6.467	6.138	5.985
18	0.360	7.315	6.874	6.482	6.064	43	0.860	6.986	6.539	6.206	5.866
19	0.380	7.300	6.866	6.473	6.057	44	0.880	6.977	6.542	6.195	5.816
20	0.400	7.312	6.874	6.483	6.065	45	0.900	6.963	6.552	6.204	6.246
21	0.420	7.327	6.891	6.496	6.077	46	0.920	7.138	6.755	6.385	5.902
22	0.440	7.335	6.904	6.513	6.099	47	0.940	7.219	6.851	6.471	6.010
23	0.460	7.293	6.866	6.481	6.073	48	0.960	7.205	6.824	6.470	5.981
24	0.480	7.257	6.833	6.453	6.046	49	0.980	7.140	6.742	6.410	5.893
25	0.500	7.234	6.814	6.436	6.029	50	1.000	7.030	6.616	6.285	5.812

Nota: Elaboración propia.

C) Análisis de la Validación del modelo

De la misma manera se uso aplicación de la función de corrección 3.8.5, además se uso los mismos parámetros Hardening Soil usados para la calibración y validación del ensayo Deflectómetro de impacto ligero (LWD) en el modelo de relleno estructural en trasdós de muro de contención. (tabla 26)

$$\delta_{Corregida} = 0.7337\delta_{PLAXIS} + 0.1027 \tag{4.2}$$

Tabla 26

evolución temporal de asentamiento máximos corregidos

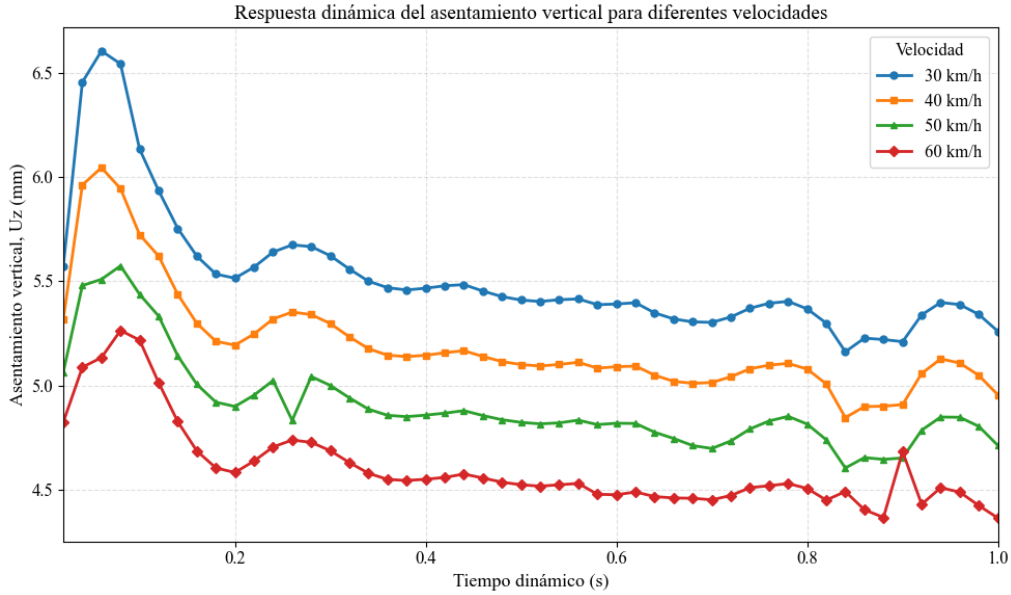
N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)				N.°	tiempo (seg)	δ_{PLAXIS} (mm)			
		30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h			30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h
1	0.020	5.572	5.317	5.065	4.826	26	0.520	5.404	5.095	4.818	4.520
2	0.040	6.454	5.962	5.480	5.089	27	0.540	5.412	5.102	4.822	4.526
3	0.060	6.603	6.044	5.510	5.135	28	0.560	5.416	5.113	4.835	4.533
4	0.080	6.542	5.944	5.574	5.265	29	0.580	5.389	5.085	4.814	4.481
5	0.100	6.134	5.724	5.438	5.219	30	0.600	5.392	5.091	4.821	4.478
6	0.120	5.934	5.621	5.334	5.015	31	0.620	5.398	5.095	4.820	4.492
7	0.140	5.754	5.438	5.144	4.828	32	0.640	5.349	5.051	4.778	4.470
8	0.160	5.621	5.299	5.007	4.688	33	0.660	5.320	5.021	4.748	4.463
9	0.180	5.535	5.213	4.922	4.607	34	0.680	5.306	5.012	4.714	4.462
10	0.200	5.515	5.195	4.901	4.585	35	0.700	5.304	5.016	4.700	4.454
11	0.220	5.568	5.248	4.955	4.640	36	0.720	5.330	5.043	4.736	4.475
12	0.240	5.641	5.320	5.026	4.707	37	0.740	5.371	5.082	4.793	4.512
13	0.260	5.675	5.353	4.834	4.740	38	0.760	5.395	5.099	4.832	4.522
14	0.280	5.667	5.341	5.044	4.729	39	0.780	5.404	5.107	4.854	4.532
15	0.300	5.623	5.298	5.002	4.689	40	0.800	5.368	5.080	4.817	4.509
16	0.320	5.559	5.234	4.942	4.633	41	0.820	5.300	5.009	4.742	4.453
17	0.340	5.501	5.178	4.888	4.581	42	0.840	5.163	4.848	4.606	4.494
18	0.360	5.470	5.146	4.859	4.552	43	0.860	5.228	4.900	4.656	4.407
19	0.380	5.459	5.140	4.852	4.547	44	0.880	5.222	4.903	4.648	4.370
20	0.400	5.467	5.146	4.860	4.553	45	0.900	5.211	4.910	4.654	4.685
21	0.420	5.479	5.158	4.869	4.561	46	0.920	5.340	5.059	4.788	4.433
22	0.440	5.484	5.168	4.881	4.578	47	0.940	5.399	5.129	4.851	4.512
23	0.460	5.454	5.140	4.858	4.558	48	0.960	5.389	5.109	4.849	4.491
24	0.480	5.427	5.116	4.838	4.539	49	0.980	5.342	5.050	4.806	4.426
25	0.500	5.411	5.102	4.825	4.526	50	1.000	5.261	4.957	4.714	4.367

Nota: Elaboración propia.

En la tabla 26, representa los valores corregidos para asentamiento en tradós de muro de contención.

Figura 74

Evolución temporal del desplazamiento vertical (Uz)



Nota: Elaboración propia

La Figura 74 presenta la evolución temporal del asentamiento vertical máximo del relleno ubicado en el trasdós del muro de contención para velocidades de 30, 40, 50 y 60 km/h. Se observa un comportamiento dinámico similar al del terraplén durante la etapa inicial, alcanzándose los máximos asentamientos entre 0.08 y 0.10 s. Sin embargo, posteriormente las curvas muestran una respuesta considerablemente más estable.

Los asentamientos máximos alcanzaron aproximadamente 6.60 mm para 30 km/h, 6.05 mm para 40 km/h, 5.56 mm para 50 km/h y 5.27 mm para 60 km/h. A diferencia del terraplén, las curvas presentan menores amplitudes de oscilación y una disminución más gradual del asentamiento durante el resto del análisis.

Al incrementar la velocidad de 30 km/h a 60 km/h el asentamiento máximo disminuyó aproximadamente de 6.05 mm a 5.27 mm, equivalente a una reducción cercana al 20 %, evidenciando una menor interacción temporal entre la carga y el terreno.

Este comportamiento evidencia que el muro de contención modifica significativamente la respuesta dinámica del relleno, actuando como un elemento de confinamiento lateral que restringe la propagación horizontal de las deformaciones.

D) Contrastación de la hipótesis

Los resultados obtenidos presentan concordancia con estudiado por Badr and Mohammed Shafiqu, 2023 titulado "Predicting the Performance of Retaining Structure under Seismic Loads by PLAXIS Software", donde se demuestra que las estructuras de contención modifican significativamente la distribución de esfuerzos y deformaciones del relleno. Aunque dicho estudio considera acciones sísmicas, el mecanismo de interacción suelo-estructura observado es equivalente al registrado bajo cargas vehiculares.

Asimismo, el estudio realizado por Yousheng Deng et al., 2023 titulado "Research on Static and Dynamic Loading Performance of Geosynthetic Reinforced and Pile-Supported Embankment" concluye que el incremento del confinamiento reduce la deformación permanente y mejora la estabilidad dinámica del relleno. Este comportamiento coincide con la presente investigación, donde el muro de contención limita la dispersión lateral del bulbo de esfuerzos.

La hipótesis específica N.° 2 se acepta debido a que el modelo numérico reprodujo adecuadamente la evolución temporal de los asentamientos, mostró concordancia con los ensayos LWD y presentó un comportamiento consistente con los mecanismos de interacción suelo-estructura reportados en la literatura internacional.

4.2.3 Hipótesis Específico 03

De la hipótesis específica 03 estableque que: El módulo de elasticidad del rellenos estructural influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones.
Para sustentar esta afirmación, se empleo el método de análisis de sensibilidad.

A) Respuesta

El análisis paramétrico realizado permite identificar la influencia de cada parámetro en la magnitud de las deformación.
Se analizo los parámetros siguientes:

- El módulo de elasticidad (E), es el parámetro más influyente, reduciendo significativamente los asentamientos al incrementarse.
- Ángulo de fricción (ϕ'): En rellenos compactados, pequeñas variaciones afectan

la estabilidad interna y el empuje lateral.

- Dilatancia (ψ): Importante en arenas densas o rellenos muy compactados para evaluar el cambio de volumen durante el corte.

Se evaluó la influencia de tres parámetros mediante un análisis de sensibilidad normalizada:

$$S = \frac{\Delta Y/Y_0}{\Delta X/X_0} = \frac{(\frac{Y_i - Y_0}{Y_0})}{(\frac{X_i - X_0}{X_0})} \tag{4.3}$$

Donde:

- X: Parámetros geotécnico.
- Y: Respuesta del modelo
- X_0 : Caso base
- Y_0 : Respuesta base

Interpretación de sensibilidad

Valor S	**Interpretación**
$S < 0.20$	baja
$0.2 \leq S < 1$	Moderada
$S \geq 1$	Alta

La tabla 27 presenta el análisis de sensibilidad del asentamiento máximo (Uz,max) al variar $\mp$ 30 % tres parámetros geotécnicos del modelo Hardening Soil: el módulo de elasticidad (E), el ángulo de fricción interna (ϕ) y el ángulo de dilatancia (ψ).

Tabla 27

Cálculo de variaciones Normalizadas para relleno en trasdós de muro de contención v=30 km/h

	Módulo de elasticidad			Ángulo de Dilatancia			Ángulo de fricción		
Variación (%)	Uz (mm)	ΔU_z%	índice S_{norm}	Uz (mm)	ΔU_z%	índice S_{norm}	Uz (mm)	ΔU_z%	índice S_{norm}
70%	6.861	3.91%	-0.13	6.623	0.29%	-0.01		-	-
80%	6.755	2.30%	-0.115	6.608	0.08%	-0.004	7.175	8.67%	-0.433
90%	6.667	0.96%	-0.096	6.607	0.05%	-0.006	6.765	2.46%	-0.245
100%	6.603	0.00%	0	6.603	0.00%	0	6.603	0.00%	0
110%	6.468	-2.04%	-0.205	6.597	-0.09%	-0.009	6.376	-3.44%	-0.344
120%	6.438	-2.49%	-0.125	6.587	-0.24%	-0.012	6.168	-6.59%	-0.329
130%	6.410	-2.92%	-0.097	6.575	-0.43%	-0.014	5.912	-10.47%	-0.349

Fuente: Elaboración propia.

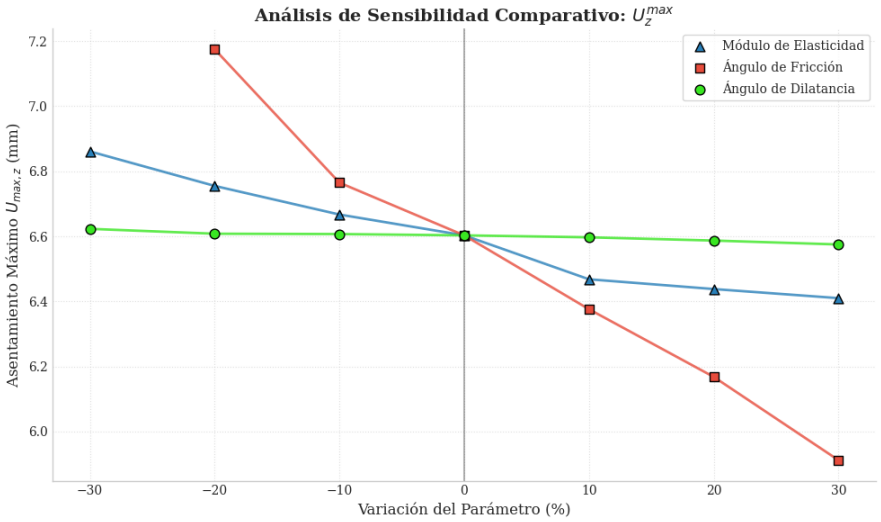
Los resultados del Índice de sensibilidad normalizado permiten cuantificar la influencia relativa de cada parámetro geotécnico sobre el asentamiento máximo del relleno estructural.

- **El parámetro Ángulo de fricción** El ángulo de fricción presenta los mayores valores absolutos del índice de sensibilidad, lo cual indica que pequeñas variaciones relativas del ángulo de fricción producen cambios mayores en el asentamiento. Según este comportamiento el ángulo de fricción controla directamente la resistencia al corte y la capacidad del material para movilizar esfuerzos internos, modificando significativamente la distribución de tensiones y la rigidez efectiva del relleno.
- **Modulo de elasticidad** Los valores muestran una sensibilidad intermedia, el cual indica que el incremento de la rigidez reduce las deformaciones, aunque su influencia es menor que la ejercida por el ángulo de fricción. El módulo de elasticidad controla principalmente la deformación elástica inicial del material y por lo tanto afecta la magnitud de los asentamiento sin modificar de manera significativa la resistencia última del suelo.
- **Ángulo de dilatancia**

  Presenta índices muy próximos a cero, evidenciando una influencia prácticamente despreciable sobre el asentamiento máximo. Este resultado indica que bajo las condiciones analizadas y para los niveles de deformación alcanzados, la respuesta del relleno esta influenciado por la rigidez y la resistencia al corte.

Figura 75

Asentamiento vs Rango: Caso relleno en trasdós de muro de contención



Nota: Elaboración propia

Se observa que el incremento de cualquiera de los tres parámetros produce una disminución del asentamiento vertical máximo; sin embargo, la magnitud de dicha reducción es diferente para cada parámetro.

Este comportamiento se debe a que el ángulo de fricción controla directamente la resistencia al corte movilizada por el modelo Hardening Soil, modificando la capacidad del relleno para redistribuir esfuerzos y limitar el desarrollo de deformaciones permanentes.

Discusión de los resultados.

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que las variaciones del módulo de elasticidad modifican de forma sistemática la magnitud de los asentamientos, que confirma que un incremento de la rigidez del relleno reduce las deformaciones inducidas por las cargas vehiculares. Sin embargo, el análisis comparativo evidencia que el angulo de fricción ejerce una influencia aún mayor sobre la respuesta deformacional, mientras que el ángulo de dilatancia presenta un efecto prácticamente despreciable.

Los resultados obtenidos muestran que el incremento del módulo de elasticidad reduce progresivamente el asentamiento máximo del relleno estructural. Este comportamiento coincide por lo estudiado por Wallner, Stummer and Schlicke, 2025, donde demuestra que la representación adecuada de la rigidez del sistema constituye uno de los factores más importantes para la predicción de asentamientos mediante elementos finitos. Ambos estudios evidencian que el incremento de la rigidez disminuye la deformabilidad

global, reduciendo los desplazamientos verticales.

Además los resultados presentan una estrecha concordancia por lo estudiado por Zhou, Zhang and Osman, 2024, donde demuestra que la rigidez del suelo controla directamente la magnitud de las deformaciones desarrolladas durante el proceso de carga. Nour et al., 2002, establece que pequeñas variaciones en los parámetros mecánicos del suelo producen modificaciones apreciables en los asentamientos calculados mediante elementos finitos.

Por lo tanto, la hipótesis específica 03 se acepta parcialmente. Se confirma que el módulo de elasticidad influye significativamente en la magnitud de las deformaciones, tal como planteala en la hipótesis, no obstante, los resultados de esta investigación demuestran que el ángulo de fricción constituye el parámetro geotécnico de mayor sensibilidad y control sobre las deformaciones.

En el modelo estudiado las limitados presentes son:

- El modelo representa condiciones específicas del tramo estudiado.
- Se empleó un modelo Hardening Soil calibrado con LWD.
- No se consideraron variaciones climáticas.
- No se evaluó deterioro progresivo por fatiga.

Conclusiones

Conclusiones

1. La investigación demostró que el Método de Elementos Finitos implementado en PLAXIS 3D constituye una metodología confiable para estimar las deformaciones inducidas por cargas vehiculares en rellenos estructurales. La validación experimental mediante el ensayo Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD) evidenció una adecuada concordancia entre los resultados numéricos y los datos de campo, confirmando la capacidad del modelo para representar el comportamiento mecánico del sistema suelo-estructura bajo condiciones dinámicas. En consecuencia, se cumplió el objetivo general de evaluar numéricamente las deformaciones producidas por cargas vehiculares en rellenos estructurales de la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora).
2. El análisis numérico permitió estimar la respuesta dinámica del terraplén frente al tránsito vehicular para velocidades de 30, 40, 50 y 60 km/h, observándose una disminución progresiva del asentamiento máximo conforme aumentó la velocidad de circulación. Los asentamientos variaron entre 6.45 mm y 5.34 mm, representando una reducción aproximada del 17 %, lo que demuestra que el tiempo de interacción entre la carga móvil y el terreno influye directamente en la magnitud de las deformaciones. Asimismo, el modelo reprodujo adecuadamente la evolución espacial del bulbo de deformación y la disipación progresiva de la energía durante el análisis dinámico
3. El modelamiento del relleno estructural ubicado en el trasdós del muro de contención evidenció que la presencia del muro modifica significativamente la respuesta deformacional del sistema suelo-estructura. Los asentamientos máximos disminuyeron conforme aumentó la velocidad del vehículo, registrándose valores entre 6.60 mm y 5.27 mm. El confinamiento lateral impuesto por el muro incrementó la rigidez aparente del relleno y limitó la propagación lateral de

las deformaciones, permitiendo una redistribución más eficiente de los esfuerzos. Estos resultados demuestran que la interacción entre el relleno y la estructura de contención debe ser considerada en el análisis y diseño geotécnico de este tipo de obras.

4. El análisis de sensibilidad permitió identificar que el ángulo de fricción interna fue el parámetro geotécnico con mayor influencia sobre los asentamientos, seguido por el módulo de elasticidad, mientras que el ángulo de dilatancia presentó una influencia prácticamente despreciable dentro del rango de deformaciones analizado. Estos resultados demuestran que la resistencia al corte constituye el principal mecanismo que controla la respuesta deformacional del relleno estructural y proporcionan un criterio técnico para priorizar la determinación experimental y la calibración de los parámetros del modelo Hardening Soil, mejorando la confiabilidad de las simulaciones numéricas.

Recomendaciones

1. Implementar la metodología de análisis numérico desarrollada mediante el Método de Elementos Finitos (PLAXIS 3D) como herramienta de apoyo en el diseño geotécnico de carreteras de bajo y mediano volumen de tránsito, especialmente en proyectos que incluyan terraplenes y rellenos estructurales ubicados en trasdós de muros de contención.
2. Complementar el modelamiento numérico con programas de instrumentación y monitoreo en campo, mediante ensayos Deflectómetro de Impacto Ligero (LWD), placas de carga, sensores de deformación u otros sistemas de medición, con la finalidad de calibrar y validar los parámetros constitutivos empleados en las simulaciones y mejorar la confiabilidad de las predicciones.
3. Emplear modelos constitutivos avanzados, como Hardening Soil Small (HSsmall), cuando se requiera analizar deformaciones ocasionadas por cargas dinámicas repetitivas o de pequeña amplitud, debido a que estos modelos representan con mayor precisión la degradación y recuperación de la rigidez del suelo.
4. Incorporar en el diseño geotécnico condiciones reales de operación del tránsito, considerando velocidades de circulación, configuraciones de carga vehicular y distribución de cargas por eje, con el propósito de obtener estimaciones más

representativas de los asentamientos y de la respuesta dinámica de los rellenos estructurales.

5. Priorizar la determinación experimental del ángulo de fricción interna y del módulo de elasticidad durante la caracterización geotécnica de los materiales de relleno, debido a que el análisis de sensibilidad demostró que estos parámetros ejercen la mayor influencia sobre la magnitud de las deformaciones obtenidas mediante el modelo Hardening Soil.

Trabajos futuros

1. Evaluar el comportamiento dinámico de los rellenos estructurales considerando un mayor rango de velocidades de circulación y diferentes configuraciones vehiculares, incluyendo vehículos pesados con distintas distribuciones de carga por eje, con el fin de ampliar la aplicabilidad del modelo desarrollado.
2. Desarrollar modelos numéricos que integren simultáneamente cargas vehiculares y acciones sísmicas, permitiendo evaluar la respuesta del sistema suelo-estructura bajo escenarios de carga combinada y aportar criterios para el diseño de infraestructura vial en zonas de alta sismicidad.
3. Incorporar fenómenos dependientes del tiempo, tales como consolidación, fluencia (creep) y degradación progresiva de la rigidez, con el propósito de estimar el comportamiento deformacional de los rellenos estructurales durante la vida útil de la carretera.
4. Explorar la aplicación de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para desarrollar modelos predictivos de asentamientos, integrando información geotécnica, propiedades de los materiales y condiciones de carga, con el objetivo de optimizar el diseño y reducir los tiempos de análisis en proyectos de infraestructura vial.

Referencias Bibliográficas

Abdelsalam, M. & Seyedi, M. (2025). Numerical Evaluation of Pile-Driving-Induced Vibrations in Soil and Their Impact on Adjacent Structures. *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, *3*(1), 17–32. doi:10.56578/jche030103

Algadi, A. M. H. & Seyedi, M. (2025). Influence of Rail–Track Structural Irregularities on Train-Induced Ballast Settlement. *Mathematical Modelling for Sustainable Engineering*, *1*(1), 63–72. doi:10.56578/mmse010105

Antonov, V., Al-Naqdi, I., Monastyrev, P., Pakhomova, E. & Amelin, V. (2021). The Use of Programs Complexes ANSYS and Plaxis 3D in Assessing the Influence of the Density of Sand Base on the Modulus of Deformation. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1138, p. 012002). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/1138/1/012002

Badr, M. M. & Mohammed Shafiqu, Q. S. (2023). Predicting the Performance of Retaining Structure under Seismic Loads by PLAXIS Software. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, *32*(1), 20220251. doi:10.1515/jmbm-2022-0251

Benz, T. (2022). *Small-Strain Stiffness in Advanced Soil Modelling*. Springer.

Boussinesq, J. (1885). *Aplicación de potenciales al estudio del equilibrio y el movimiento de sólidos elásticos*. Gauthier-Villars.

Brinkgreve. (2016). *PLAXIS 2016. the Netherlands Delft University of Technology y PLAXIS bv.*

Brinkgreve, K. & Swolfs. (2018). *PLAXIS 3D Reference Manual. Bentley Systems.*

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. et al. (2023). *PLAXIS 3D Reference Manual*. Bentley Systems.

Chen, Y., Zhang, L., Xu, L., Zhou, S., Li, Y., Su, N. & Lu, Z. (2022, November). In-situ and numerical investigation on dynamic response of asphalt pavement-low slag embankment system under traffic loading. *Transportation Geotechnics*, *37*. doi:10.1016/j.trgeo.2022.100884

Cudny, M. & Truty, A. (2020). Refinement of the Hardening Soil Model within the Small Strain Range. *Acta Geotechnica*, *15*(8), 2031–2051. doi:10.1007/s11440-020-00945-5

Das, B. M. [Braja M.]. (2010). Principles of geotechnical engineering.

Das, B. M. [Braja M] & Sivakugan, N. (2016). *Introduction to geotechnical engineering*. Cengage.

DelaCruz. (2023). Modelación en Plaxis 3D de suelos no saturados. *Simposio internacion de estructuras, geotecnia y materiales de contruccion*.

Delft Plaxis, m. (2004). *Plaxis Versión 8 Manual de Referencia., Delft Plaxis b.v.*

Deng, Y. [Yong], Luo, X., Gu, F., Zhang, Y. & Lytton, R. L. (2019). 3D simulation of deflection basin of pavements under high-speed moving loads. *Construction and Building Materials*, *226*, 868–878. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.228

Deng, Y. [Yousheng], Zhao, H., Li, L., Yao, Z. & Li, L. (2023). Research on Static and Dynamic Loading Performance of Geosynthetic Reinforced and Pile-Supported Embankment. *Applied Sciences*, *13*(24), 13152. doi:10.3390/app132413152

der Sloot M, V. (2018). *Plaxis SoilTest. SoilModels.com. Official Distributor Text.*

Desai, C. S. & Siriwardane, H. J. (1984). Constitutive laws for engineering materials, with emphasis on geologic materials. *(No Title)*.

Duncan, J. M. & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley & Sons.

El Koufachy, N., Seyedi, M. & Saedi, S. (2025). 3D Modelling of Pavement Deflections Considering the Variations in Temperatures, Moving Vehicle Speeds, and Axle Loads. *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, *3*(4), 181–187. doi:10.56578/jche030401

Fernández, J. & Medina, L. (2017). Methodology for Predicting Vibrations Induced by Underground Railways in 2D Numerical Models: A Real Case in Madrid, Spain. *Revista Ingeniería de Construcción*, *32*(3), 173–184. doi:10.4067/S0718-50732017000300173

Figueredo Sosa, S., Cobelo Cristiá, W. & Fernández Lorenzo, I. (2014). 3D Numerical Analysis of Composite Piled-Raft Foundation. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, *37*(2), 116–124. Retrieved el 19 de July de 2026, from https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702014000200003&lang=en

Fleming, P. R. [P. R.], Frost, M. W. & Rogers, C. D. F. (2021). Application of the Light Weight Deflectometer for Quality Assessment of Granular Layers. *Road Materials and Pavement Design*.

Fleming, P. R. [Paul R.], Frost, M. W. & Lambert, J. P. (2007). Review of Lightweight Deflectometer for Routine in Situ Assessment of Pavement Material Stiffness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2004*(1), 80–87. doi:10.3141/2004-09

Gamero, M. A. E. (2021). *Analisis comprativo de rellenos estructurales utilizando relleno fluidos y relleno con material de prestamo en la subestructuradel puente Peña ubicado en el Km 33+300 del distrito de Ignacion Escudero, provincia de Sullana, region Piura* (Tesis pregrado). Universidad privada Antenor Orrega - Peru. Retrieved from https://hdl.handle.net/20.500.12759/7381

Hassan, F. M. & Zakraia, W. A. (2024). Numerical Study of Soil–Retaining Wall Behavior Subjected to Dynamic Loading Using PLAXIS 3D. *Diyala Journal of Engineering Sciences*.

Herhuay, M. (2024). *Mejora de las propiedades mecánicas del suelo con el uso del relleno fluido de resistencia controlada como sustituto del relleno estructural convencional, Pasco 2022* (Tesis pregrado). Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion - Cerro de Pasco -Peru.

Hernandez. (2020). Metodologia de la investigacion las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Mcgraw hill Mexico.

Huamán, R. (2021). *Aplicación del método de elementos finitos para la evaluación comparativa en el cálculo de deformaciones en pavimentos de obras viales urbanas, Cusco* (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad Alas Peruanas, Cusco, Perú.

Kondner, R. (1963). A hyperbolic stress strain formulation for sands. 2. Pan. Am. ICOSFE Brazil, 1, 289–324.

Laera, A., Bui, T. A. & Brasile, S. (2023). Finite Element Modelling of Unsaturated Soils Using a Modified Version of the Barcelona Basic Model. En *E3S Web of Conferences* (Vol. 382, p. 15005). 8th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2023). EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/202338215005

Manual de carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (EG-2013). Retrieved from Resolucion%20Directoral%20N%2003%202018%20MTC%2014

Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014).

Mella Figueroa, M. A. (2022). *Análisis crítico de parámetros de deformación para la estimación de asentamientos en edificios en Concepción* (Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Retrieved from https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/0cd8baab-863a-4aa2-81e8-185f63827431/content

Melnikov, R., Zazulya, J., Stepanov, M., Ashikhmin, O. & Maltseva, T. (2016). OCR and POP Parameters in Plaxis-based Numerical Analysis of Loaded over Consolidated Soils. *Procedia Engineering*, *165*, 845–852. 15th International scientific conference "Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development" 12-15 September 2016, St. Petersburg, Russia. doi:https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Plan Nacional de Servicios e Infraestructura Logística de Transporte al 2032*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Lima, Perú. Retrieved el 28 de August de 2026, from https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/4221549-plan-nacional-de-servicios-e-infraestructura-logistica-de-transporte-al-2032

Nieto Leal, A., Camacho Tauta, J. F. & Ruiz Blanco, E. F. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos mohr-coulomb y hardening soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, *8*(15), 75–91.

Nour, A., Slimani, A. & Laouami, N. (2002). Foundation Settlement Statistics via Finite Element Analysis. *Computers and Geotechnics*, *29*(8), 641–672. doi:10.1016/S0266-352X(02)00014-9

Obradović, N. & Jocković, S. (2026). Numerical Evaluation of Road Embankment Settlements. *Journal of Road and Traffic Engineering*, *72*(5), 84–91. doi:10.31075/6SKP.08

Obrzud, R. F. (2010). On the use of the Hardening Soil Small Strain model in geotechnical practice. *Numerics in geotechnics and structures*, *16*, 1–17.

Obrzud & Truty. (2018). *THE HARDENING SOIL MODEL - A PRACTICAL GUIDEBOOK Rafal F. Obrzud Andrzej Truty.* PC 100701 report, revised 21.10.2018.

Olivella y saracibar, c. (2002). *Mecanica de medios continuos para ingenieros, Xavier Oliver Olivella y Carlos Agelet de Saracibar bosch.*

Osorio, A. (2008). *Metodologia de evaluacion in-situ de la capacidad de soporte de bases y subbases granulares de pavimentos flexibles con el deflectometro de impacto liviano* (Master's thesis). Pontificia Universidad Catolica de Chile, Chile.

Pereira, B. E., Oliveira, E. A. d. S. & Garcia, J. R. (2026). Numerical and Experimental Analysis of Isolated Footings on Collapsible Soil under Different Moisture and Preloading Conditions. *Soils and Rocks*, *49*(2), e2026010325. doi:10.28927/SR.2026.010325

Phoon & Kulhawy. (1999). Characterization of geotechnical variability. Canadian Geotechnical Journal. *1.*

Podolsky, J., Ashlock, J. C. & Williams, R. C. (2017). Measurement and Finite Element Modeling of the Pavement Response to Superloads. En *Geotechnical Frontiers 2017: Transportation Facilities, Structures, and Site Investigation* (pp. 146–155). Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE). doi:10.1061/9780784480441.016

Potts, D. M., Zdravković, L., Addenbrooke, T. I., Higgins, K. G. & Kovačević, N. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: application.* Thomas Telford London.

Puzrin, A. (2012). *Constitutive modelling in geomechanics: introduction.* Springer science & business media.

Quispe, J. et al. (2022). Aplicación del método de elementos finitos en la evaluación de terraplenes de carreteras en el Perú. *Revista de Ingeniería Civil.*

Ramos Dedios, J. A. & Garagorri Linares, D. A. (2026). *Diseño de un terraplén de gran altura para un proyecto de infraestructura vial* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú. Retrieved from http://hdl.handle.net/20.500.12404/32966

Razak, Z., Mukri, M. & Kasim, N. A. (2017). Prediction of Settlement by Using Finite Element Simulation 2D Program at Seksyen 7, Shah Alam. En *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1875, p. 030004). AIP Publishing. doi:10.1063/1.4998375

Rebolledo, J. F. R., León, R. F. P. & Camapum de Carvalho, J. (2019). Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*, *42*(1), 61–74. doi:10.28927/SR.421061

Ryden, N. et al. (2022). Evaluation of Unbound Granular Layers Using the Light Weight Deflectometer. *Construction and Building Materials*.

Ryś, D. & Jaskuła, P. (2018). Analysis of Pavement Structure Sensitivity to Passage of Oversized Heavy Duty Vehicle in Terms of Bearing Capacity. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 356, p. 012013). Conference on Resilient and Safe Road Infrastructure. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/356/1/012013

Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier, P. G. (1999). The Hardening Soil Model: Formulation and Verification. *Proceedings of Plaxis Symposium*, 281–296.

Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier, P. G. (2019). The hardening soil model: Formulation and verification. En *Beyond 2000 in computational geotechnics* (pp. 281–296). Routledge.

Terzaghi, K. (1943). 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York.

Umashankar, B., Hariprasad, C. & Kumar, G. (2016). Compaction quality control of pavement layers using LWD. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *28*(2), 04015111.

Vargas, L. & Rojas, M. (2023). Modelación numérica de rellenos estructurales utilizando PLAXIS 3D. *Revista Peruana de Ingeniería*.

Wallner, C., Stummer, S. & Schlicke, D. (2025). Influence of Structural Stiffness Representation in Settlement Calculations and Practical Advice. *Buildings*, *15*(18), 3270. doi:10.3390/buildings15183270

Wood, D. M. (1990). *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge university press.

Wu, C.-P. & Shen, P.-A. (1996). Dynamic Analysis of Concrete Pavements Subjected to Moving Loads. *Journal of Transportation Engineering*, *122*(5), 367–373. doi:10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:5(367)

Xu, H. L., He, L. & An, D. (2017). Study on the Vehicle Dynamic Load Considering the Vehicle–Pavement Coupled Effect. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 269, p. 012001). IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/269/1/012001

Zhou, S., Zhang, W. & Osman, A. S. (2024). Effect of Soil Stiffness on End Bearing Resistance of Foundations in Clay from Large Deformation Numerical Modelling. *Computers and Geotechnics*, *173*, 106515. doi:10.1016/j.compgeo.2024.106515

Anexo A

Matriz de consistencia

Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable	Metodología	Población y muestra
¿Cómo determinar las deformaciones en rellenos estructurales por solicitaciones de cargas vehiculares mediante el análisis numérico en el Camino Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho?	**Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales a través del análisis numérico por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera EMP. AY-780 Vecinal EMP. (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.**	**A través del análisis numérico computacional podemos estimar las deformaciones producto de las cargas vehiculares sobre los rellenos estructurales en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.**	**Variable Independiente:** Cargas Vehiculares	**Enfoque:** Se realiza bajo un enfoque cuantitativo, porque trata de identificar las dimensiones de las deformaciones. **Alcance:** La investigación aplica a un alcance exploratorio-descriptivo. **Diseño de investigación:** No experimental transversal. **Recolección de datos:** Prolectivo.	**Población:** En esta investigación se ha tenido en consideración todas las obras viales de la región sierra donde son utilizados los rellenos estructurales en la infraestructura vial, los cuales cumplen la función de soporte de las capas de pavimento y están sometidos a solicitaciones de cargas vehiculares generadas por el tránsito existente. Específicamente en la carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho. **Muestra:** Serán los tramos donde se han realizado rellenos estructurales para la conformación de terraplenes para plataforma en el Km 1+650.00 y el relleno en el trasdós de los muros de contención en el Km 1+050.00; dichos tramos fueron seleccionados por conveniencia, correspondiendo a una muestra no probabilística.

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable
• ¿Cómo determinar las deformaciones de los rellenos estructurales por solicitaciones de cargas vehiculares en conformación de terraplenes en el Camino Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho?	• Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales en la conformación de terraplenes por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.	• Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales en la conformación de terraplenes por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.	**Variable Dependiente:** Deformaciones
• ¿Cómo determinar las deformaciones de los rellenos estructurales por solicitaciones de cargas vehiculares en conformación de material de relleno en el trasdos de un muro de contención en la carretera Vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho?	• Determinar las deformaciones de los rellenos estructurales en el trasdos de los muros de contención por solicitaciones de cargas vehiculares en la carretera VecinalEMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.	• A través del método de elementos finitos podemos estimar las deformaciones en los rellenos estructurales en trasdos de los muros de contención producto de las cargas vehiculares en la Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora), en los distritos de Ayacucho y Jesús Nazareno de la provincia de Huamanga - Departamento de Ayacucho.	
• ¿Cómo influyen los parámetros geotécnicos del relleno en la magnitud de las deformaciones?	• Analizar la influencia de los parámetros geotécnicos en la respuesta deformacional del relleno.	• El módulo de elasticidad del rellenos estructural influyen significativamente en la magnitud de las deformaciones.	

Anexo B

Panel fotográfico

Figura B.1

Rellenos estructurales en terraplenes y trasdós de muro de contención



(a) *Conformación de relleno en trasdós de muro de contención*



(b) *Conformación de relleno en trasdós de muro de contención*



(c) *Conformación del terraplén*



(d) *Conformación del terraplén*



(e) *Ensayo de cono de area*



(f) *Conformación del terraplén*

Nota: Elaboración propia

Figura B.2

Realización de la calicata y ensayos de laboratorio



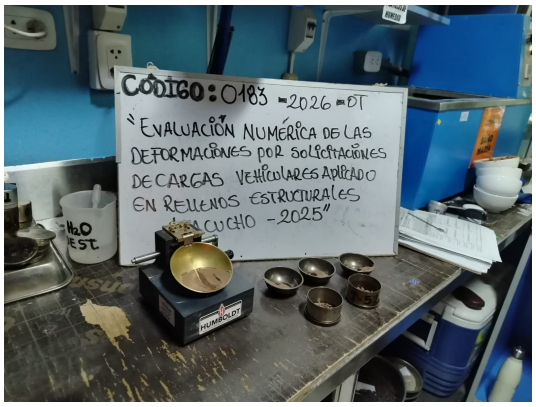
(a) *Realización de la calicata en tradó de muro*



(b) *Realización de la calicata en tradó de muro*



(c) *Clasificación de suelos*



(d) *Ensayo de límites de consistencia*



(e) *Ensayo de proctor*



(f) *Ensayo triaxial*

Nota: Elaboración propia

Figura B.3

Ensayos de campos LWD (Defléctometro de impacto ligero)



(a) *Ensayo LWD a 0.50 m del muro*



(b) *Ensayo LWD a 1.50 m del muro*



(c) *Ensayo LWD a 3.30 m del muro*



(d) *Ensayo LWD en terraplén*



(e) *Ensayo LWD a 1.50 m del muro*



(f) *Ensayo LWD en terraplén*

Nota: Elaboración propia

Anexo C

Instrumentos de recolección y registro de datos

ANEXO: INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN Y REGISTRO DE DATOS

VARIABLE INDEPENDIENTE: CARGAS VEHICULARES

Ficha de registro para modelamiento numérico en PLAXIS 3D

Campo	Información
Investigación	Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025
Variable independiente	Cargas vehiculares
Técnica	Modelamiento numérico / revisión y registro de información técnica
Instrumento	Ficha de registro de cargas vehiculares para modelamiento en PLAXIS 3D
Software	PLAXIS 3D Versión 2024.1.0.1060
Unidad de análisis	Modelo tridimensional del relleno estructural sometido a solicitaciones vehiculares
Responsable del registro	Bach. Jhon Kenyi Espinoza Barrientos
Fecha	05 / 06 / 2026
Código de ficha	CV-PLAXIS-01

1. Correspondencia con la operacionalización de la variable

Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Escala de medición	Instrumento
Magnitud de carga	Carga aplicada por eje	kN	Razón	Modelación en PLAXIS 3D
Distribución de carga	Tipo/configuración del vehículo	Adimensional	Razón	Normativa MTC / Diseño
Condición de aplicación de carga	Velocidad del vehículo	km/h o m/s	Razón	PLAXIS 3D

2. Identificación del vehículo de diseño

Característica	Registro	Unidad	Observación
Tipo de vehículo	C3	-	Vehículo de tres ejes
Número de ejes	3	ejes	1 eje delantero + 2 ejes posteriores
Carga eje delantero	7.00	Ton	Valor registrado en archivo de diseño
Carga eje posterior 1	11.50	Ton	Valor registrado en archivo de diseño
Carga eje posterior 2	11.50	Ton	Valor registrado en archivo de diseño
Separación entre ejes posteriores	1.80	m	Valor indicado en esquema
Carga total	30.00	Ton	Suma de las cargas por eje

3. Conversión de cargas a unidades del modelo

Para el ingreso de las cargas al modelo numérico se registra la equivalencia de toneladas-fuerza a kilonewtons mediante la relación aproximada 1 ton = 9.81 kN.

Eje	Carga (t)	Carga (kN)	Aplicación en PLAXIS 3D
Eje 1 – delantero	7.00	68.67	Carga aplicada sobre el eje delantero
Eje 2 – posterior	11.50	112.82	Carga aplicada sobre el eje posterior 1
Eje 3 – posterior	11.50	112.82	Carga aplicada sobre el eje posterior 2
TOTAL	30.00	294.30	Carga total del vehículo

Nota: Los valores en kN corresponden a una conversión de registro (ton x 9.81 kN/ton) y deben mantenerse coherentes con las unidades adoptadas en PLAXIS 3D.

4. Registro de la distribución de cargas

Eje	Posición/ubicación	Carga (t)	Carga (kN)	Separación entre ejes	Observación
1	Delantero	7.00	68.67	-	Eje delantero
2	Posterior	11.50	112.82	1.80 m	Eje posterior 1

Eje	Posición/ubicación	Carga (t)	Carga (kN)	Separación entre ejes	Observación
3	Posterior	11.50	112.82	1.80 m	Eje posterior 2

5. Registro de condiciones de aplicación de la carga

Función	Velocidad (m/s)	Velocidad (km/h)	Condición
MovementFunction_1	8.333	30	Velocidad constante
MovementFunction_2	11.11	40	Velocidad constante
MovementFunction_3	13.89	50	Velocidad constante
MovementFunction_4	16.67	60	Velocidad constante

6. Ficha de registro de las simulaciones

Completar esta sección para cada escenario de análisis ejecutado en PLAXIS 3D.

N.º	Código de simulación	Carga/eje (kN)	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)	Observaciones
1	S-CV-30	68.67 / 112.82 / 112.82	30	8.333	-
2	S-CV-40	68.67 / 112.82 / 112.82	40	11.11	-
3	S-CV-50	68.67 / 112.82 / 112.82	50	13.89	-
4	S-CV-60	68.67 / 112.82 / 112.82	60	16.67	-

7. Registro del ingreso de carga en PLAXIS 3D

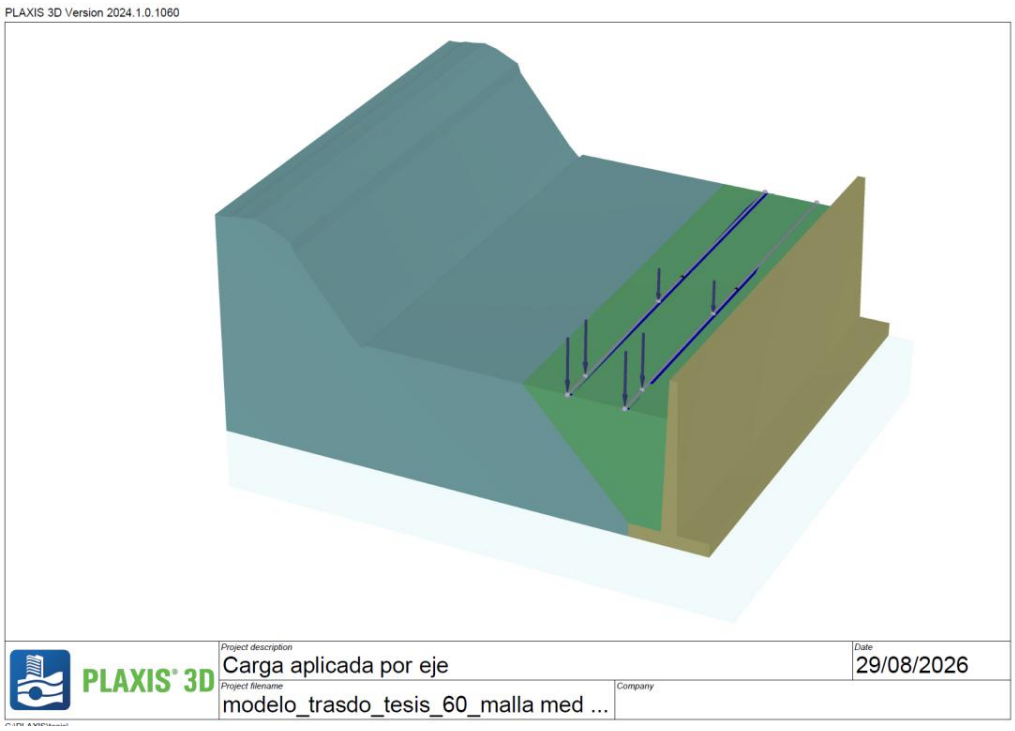
Ítem	Parámetro de entrada	Valor	Unidad	Registro/confirmación
1	Software	PLAXIS 3D 2024.1	—	☐ Verificado

Ítem	Parámetro de entrada	Valor	Unidad	Registro/confirmación
2	Tipo de carga	Carga vehicular por eje	—	☐ Verificado
3	Carga eje 1	68.67	kN	☐ Verificado
4	Carga eje 2	112.82	kN	☐ Verificado
5	Carga eje 3	112.82	kN	☐ Verificado
6	Separación ejes posteriores	1.80	m	☐ Verificado
7	Velocidad escenario 1	8.333	m/s	☐ Verificado
8	Velocidad escenario 2	11.11	m/s	☐ Verificado
9	Velocidad escenario 3	13.89	m/s	☐ Verificado
10	Velocidad escenario 4	16.67	m/s	☐ Verificado

8. Evidencia gráfica del modelamiento

Las siguientes evidencias se incorporan como respaldo del procedimiento de modelamiento y de la configuración de la carga vehicular. La primera evidencia corresponde al modelo de PLAXIS 3D con la carga aplicada por eje.

Figura 1. Modelo tridimensional en PLAXIS 3D con carga aplicada por eje.



Fuente: archivo de modelamiento PLAXIS 3D proporcionado para la investigación (29/08/2026).

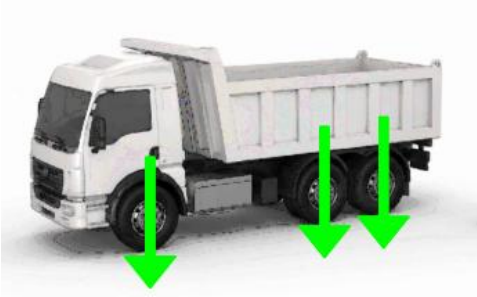


Figura 2. Vehículo de diseño y distribución de cargas por eje.

Fuente: archivo de diseño del vehículo proporcionado para la investigación.

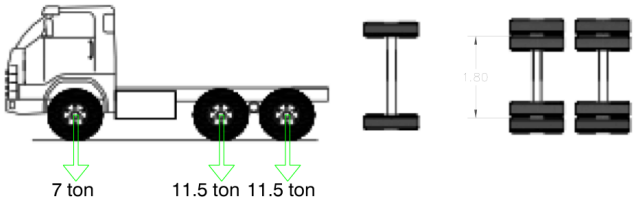


Figura 3. Configuración de ejes y separación indicada en el esquema de diseño.

Fuente: archivo de diseño del vehículo proporcionado para la investigación.

9. Evidencia de las funciones de movimiento

Se muestran cuatro funciones de movimiento lineal. En las cuatro se mantiene una aceleración de 0.000 m/s² y una velocidad constante durante el intervalo de 0 a 100 s.

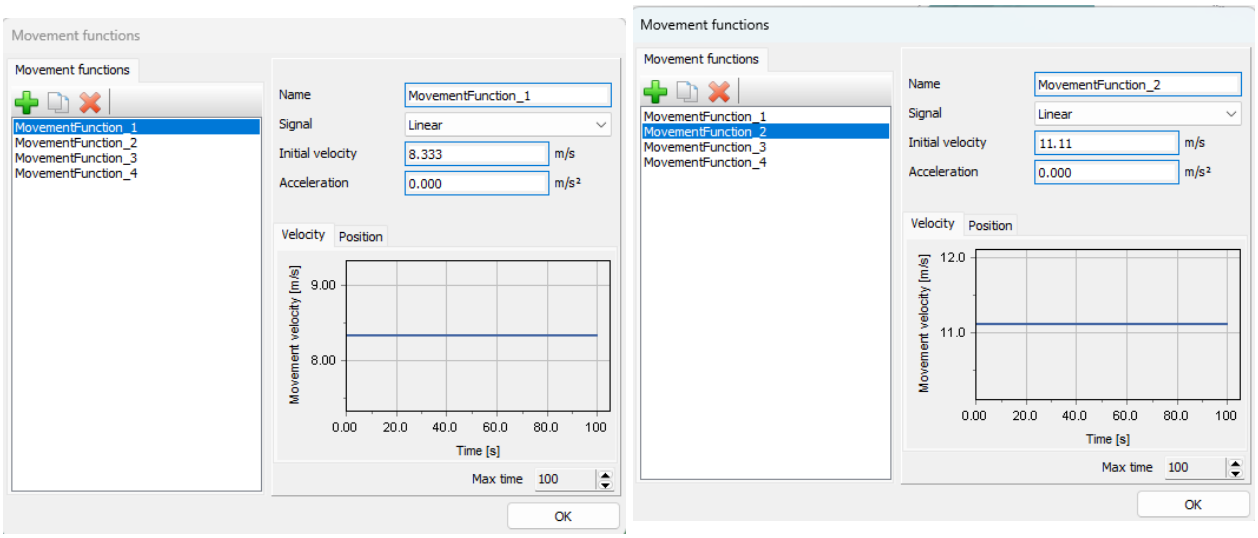


Figura 4. MovementFunction_1: velocidad inicial de 8.333 m/s (≈30 km/h).

Fuente: captura de configuración de Movement Functions en PLAXIS 3D proporcionada para la investigación.

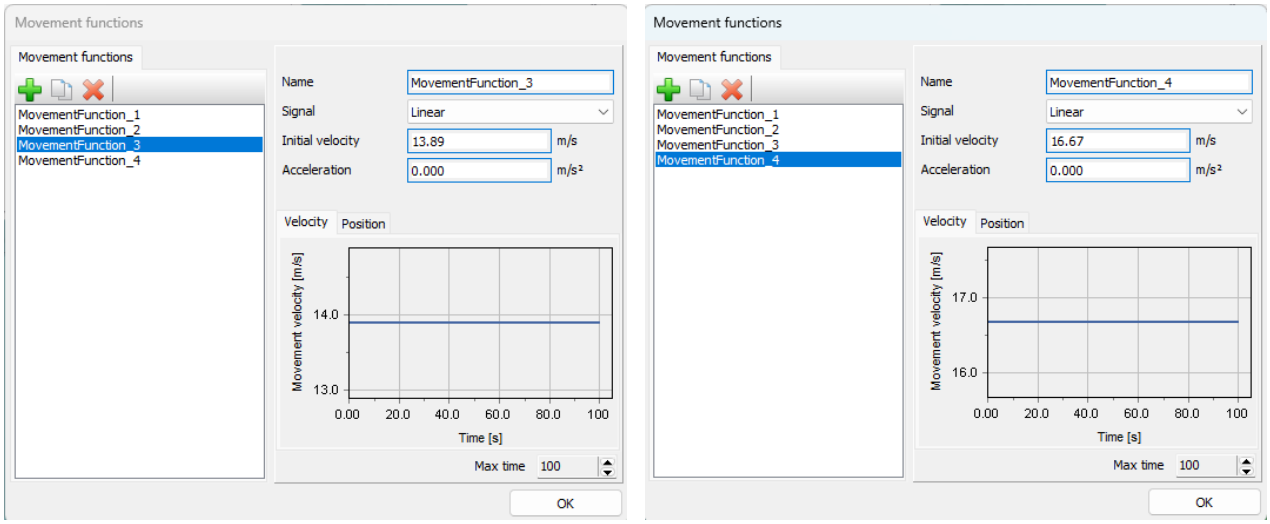


Figura 5. MovementFunction_2: velocidad inicial de 11.11 m/s (≈40 km/h).

10. Registro de control y trazabilidad

Elemento de control	Sí	No	Observaciones
La configuración del vehículo corresponde al vehículo de diseño	☐	☐	-
Las cargas por eje están expresadas en unidades compatibles con el modelo	☐	☐	-
La distribución de los tres ejes está correctamente representada	☐	☐	-
La separación entre ejes fue incorporada según el esquema	☐	☐	-
La velocidad fue definida mediante función de movimiento	☐	☐	-
La aceleración se mantuvo en 0.000 m/s²	☐	☐	-
El escenario fue guardado y documentado	☐	☐	-

11. Firmas

Responsable del registro	Revisor / asesor
_____ Nombre y firma	_____ Nombre y firma

ANEXO: INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN Y REGISTRO DE DATOS

VARIABLE DEPENDIENTE: DEFORMACIONES EN RELLENOS ESTRUCTURALES

Ficha de registro de deformaciones obtenidas mediante PLAXIS 3D

Campo	Información
Investigación	Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025
Variable dependiente	Deformaciones en rellenos estructurales
Dimensión	Respuesta deformacional
Indicador	Deformación máxima (U_zmax)
Unidad de medida	mm
Técnica	Modelamiento numérico mediante elementos finitos
Instrumento	Ficha de registro de resultados PLAXIS 3D
Software	PLAXIS 3D Version 2024.1.0.1060
Código de ficha	DR-PLAXIS-01
Responsable	Bach. Jhon Kenyi Espinoza Barrientos
Fecha	20/07/2026

1. Ficha de registro de resultados PLAXIS 3D

Los resultados siguientes fueron transcritos de los archivos de salida proporcionados. En ellos se identifica PLAXIS 3D Output Version 2024.1.0.1060.

Paso	Tiempo (s)	U_z máximo (m)	U_z máximo (mm)
43	0.0400	0.2371×10^{-3}	0.2371
75	0.3600	0.2333×10^{-3}	0.2333
107	0.6800	0.3680×10^{-3}	0.3680

Fuente: archivos de salida PLAXIS 3D proporcionados.

2. Registro de resultados para la variable dependiente

Esta tabla constituye el formato principal que se puede utilizar para consolidar los resultados de todos los escenarios de la investigación.

Escenario	Carga por eje	Velocidad	Tiempo	U_z,max (mm)	N.º de fase
E1	-	-	-	-	-
E2	-	-	-	-	-
E3	-	-	-	-	-

3. Registro de evolución temporal de la deformación

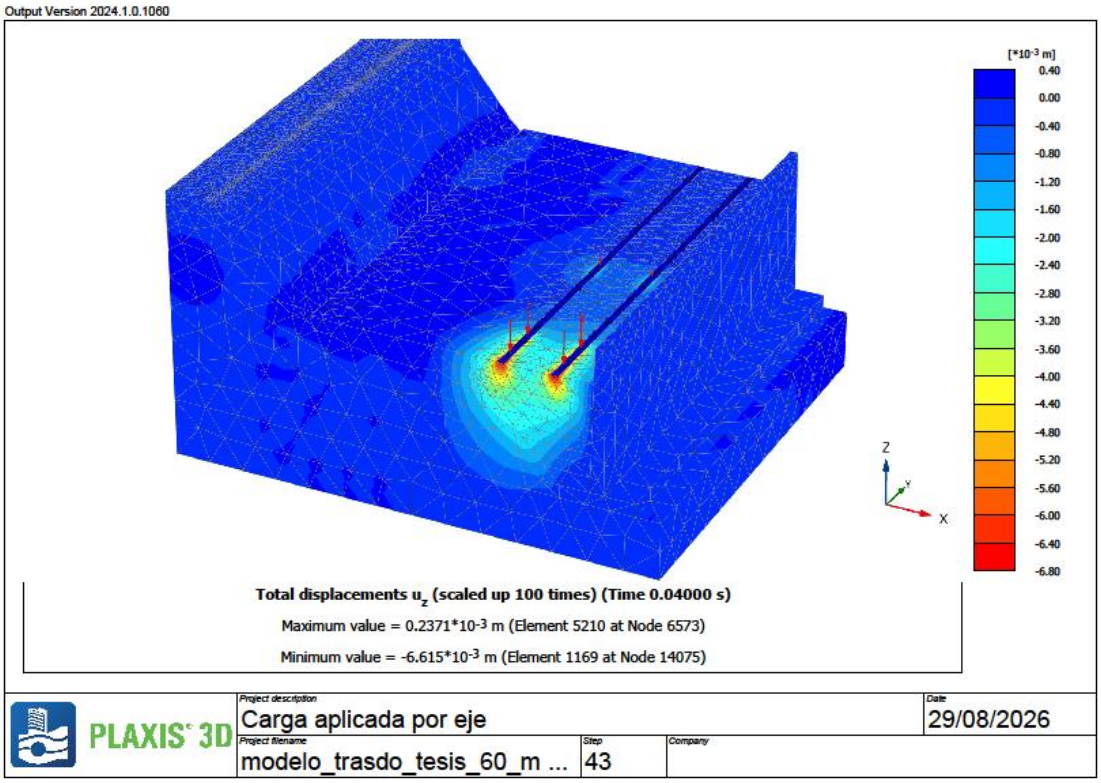
Para el análisis dinámico, registrar el desplazamiento vertical en diferentes instantes permite observar la evolución de la respuesta deformacional durante la aplicación de la carga.

Tiempo (s)	Paso	U_z,max (mm)	Tendencia / observación
0.0400	43	0.2371	-
0.3600	75	0.2333	-
0.6800	107	0.3680	-
-	-	-	-
-	-	-	_-

4. Evidencia gráfica del comportamiento deformacional

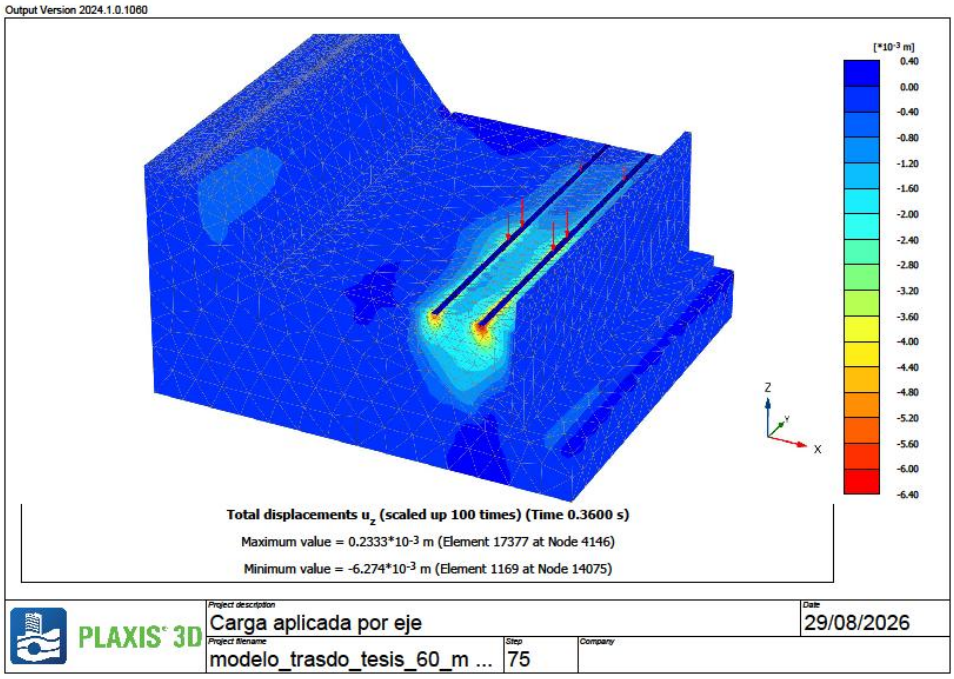
Las evidencias corresponden a mapas de contorno de desplazamiento vertical U_z en PLAXIS 3D. La escala está expresada en $\times 10^{-3}$ m y permite visualizar la distribución espacial de las deformaciones alrededor de la zona de aplicación de las cargas vehiculares.

Figura 1. Distribución de desplazamientos verticales U_z – Paso 43, tiempo 0.0400 s.



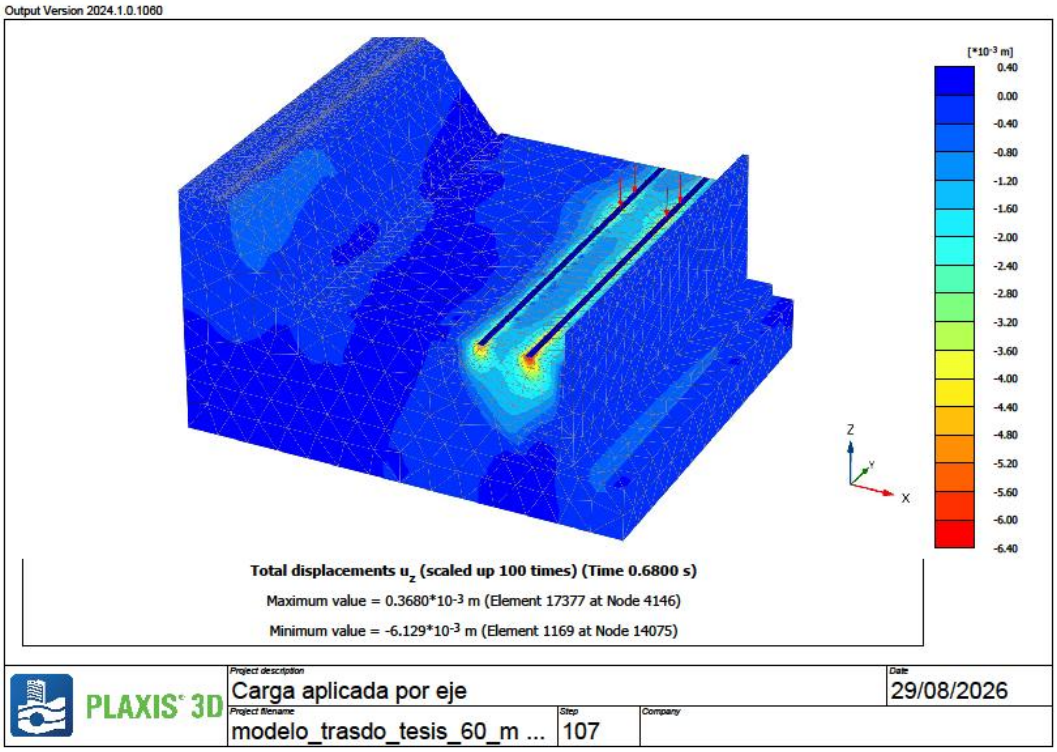
Fuente: salida gráfica de PLAXIS 3D proporcionada para la investigación.

Figura 2. Distribución de desplazamientos verticales U_z – Paso 75, tiempo 0.3600 s.



Fuente: salida gráfica de PLAXIS 3D proporcionada para la investigación.

Figura 3. Distribución de desplazamientos verticales U_z – Paso 107, tiempo 0.6800 s.



Fuente: salida gráfica de PLAXIS 3D proporcionada para la investigación.

5. Control de calidad y trazabilidad del instrumento

Criterio de control	Sí	No	Observación
El resultado corresponde a la fase de análisis dinámico	☐	☐	-
Se registró el tiempo de análisis	☐	☐	-
Se registró U_z máximo	☐	☐	-
El signo negativo de U_z fue interpretado como desplazamiento descendente	☐	☐	-
La captura de resultados fue archivada como evidencia	☐	☐	-

6. Firmas

Responsable del registro	Revisor / asesor
_____ Nombre y firma	_____ Nombre y firma

Anexo D

Guía para la ejecución del ensayo con deflectómetro de impacto ligero TERRATEST 9000 LWD

Manual

Version 1.0.0

Light Weight Deflectometer
„TERRATEST 9000 LWD“

According to following international standards:

ASTM E2583

European Union CEN ICS 93.020

IAN73 (UK)

UNI11531-1 (ANAS ITALIA)

TERRATEST LWD GmbH
Dianastrasse 4 · 16515 Oranienburg / Berlin
GERMANY
Tel.: +49 3301 700 700
www.terratest-lwd.com · info@terratest-lwd.com

TERRATEST LWD GmbH warrants continuous improvement and further development of its products and therefore reserves the right to technical modifications without prior notice. This document is protected by copyright. Duplication, modification, publication, passing on to third parties and translation into any other language without explicit approval of TERRATEST LWD GmbH is prohibited.

® January 2019 TERRATEST LWD GmbH. All rights reserved.

Table of Contents

1 Documentation 5
1.1 Introduction 5
1.2 General Safety Notes 5
1.3 Safety Precautions for Power Supply 6
1.3.1 Power Supply 6
1.3.2 Mains Power Supply 6
1.4 Safety Precautions During Operation 6
1.5 Packaging 8
2 Scope of Delivery 9
2.1 Basic Package 9
2.2 Options Upon Request 9
2.3 General View 10
3 Specification 11
3.1 Device Designation 11
3.2 Serial Number 11
3.3 Basic Unit 11
3.4 Ambient Conditions 11
3.5 Power Supply 11
3.6 Battery Power 12
3.7 Charging Procedure 13
3.8 Exchange of Battery 14
4 General Overview 15
4.1 Introduction 15
4.2 Innovations 15
4.2.1 Mechanical Innovations: 15
4.2.2 Electronic Innovations: 15
4.3 Dynamic Load Plate Test 15
4.4 Scope of Application 16
4.5 Calibration 16
4.6 Rules for Proper Use 16
4.7 Assembly 17
4.7.1 Load Plate Diameter 20
4.7.2 Mass of Falling Weight 22
4.7.3 Connection of the external geophones, optionally available 23
4.7.4 Vibration Dampers 24
4.8 Dismantling 25
5 Measurement with „TERRATEST 9000 LWD“ 26
5.1 Preparing the Testing Point 26
5.2 Test Execution 26
5.3 „Magic Eye“ 28
5.3.1 „Magic Eye“ RED 28
5.3.2 „Magic Eye“ BLUE 28
5.3.3 „Magic Eye“ GREEN 28
6 Smartphone-App „TERRATEST 9000 LWD“ 29
6.1 Installation 29
6.1.1 System Requirements 29
6.1.2 Installation of „TERRATEST 9000 LWD“ App 29
6.2 Operating Elements of App „TERRATEST 9000 LWD“ 30
6.3 Settings 31
6.3.1 User Profile 32

2 SCOPE OF DELIVERY

2.1 BASIC PACKAGE

Light weight deflectometer acc. to ASTM E2583 „TERRATEST 9000 LWD“

Consisting of:

- Load plate „DUO-SWITCH“ for easy exchange of plate diameter between 300 mm / 11.8‘‘ and 150 mm / 5.9‘‘;
  as well as
  - Load plate diameter 100 mm / 3.9‘‘
  - Central geophone, measures duration and maximum elasticity
  - Measuring electronics
    with „Magic Eye“ to control the measuring procedure,
    transmits measuring results via Bluetooth® to smartphone
    with 1 piece Lithium-Ion battery Sony US 18650 VTC 6
  - Ultraprecise load cell to measure duration and maximum value of impact
  - 4 pcs. vibration dampers
- Falling weight 10 kg / 22 lbs
- Releasing device for adjustment of falling height
- Smartphone holding device for comfortable utilization of smartphone-App
- Support disc to screw on the guide rod for smartphone holding device
- Power pack 100 ... 240 V / 9 V 2 A with LEMO plug
- Manual in English language
- Calibration log acc. to manufacturer specification

2.2 OPTIONS UPON REQUEST

- 2 pcs. external geophones
- Load plate, diameter 200 mm / 7.8‘‘
- 2 pcs. additional falling weights with 5 kg / 11 lbs each
- Transport box VENEZIA with integrated
  carrying handles and castors
- Transport system CARRELLO
- Tires adequate for construction sites
  for transport box VENEZIA



2.3 General View

Smartphone-holding device with support disc on guide rod

Releasing device with eccentric clamp

Two-part guide rod

Additional falling weights 5 kg (11 lbs) each (upon request)

Falling weight 10 kg (22 lbs) with weight catching grip

Vibration damper

Load cell

Central geophone

Magic Eye

Electronics of light weight deflectometer

Connection sockets for external geophone

OFF/ON button

Loading socket for power pack

Star screws for adjustment of plate diameter 300/150 mm

Angled load plate handles

External geophone (upon request)

Load plate ring for diameter 200 mm (upon request)



3 SPECIFICATION

3.1 DEVICE DESIGNATION

TERRATEST 9000 LWD

3.2 SERIAL NUMBER

The serial number of the instrument consists of a four-digit number, attached in the form of a sticker to the cylinder of the central geophone. This sticker should never be removed or become unreadable. The serial number of external geophones and measuring instrument is identical. Additionally, external geophone 1 carries designation /G1, the second designation /G2.

3.3 BASIC UNIT

Weight of device	26 kg / 53.8 lbs
Height of device	1.400 mm / 54.6‘‘
Maximum adjustable falling height of falling weights	900 mm / 35.1‘‘
Weight of falling weights	10 kg / 22 lbs, optionally 15 kg / 33 lbs, 20 kg / 44 lbs
Impact	0 - 15 kN / 3370 lbf, Maximum impact with optional falling weight 20 kg / 44 lbs
Duration of impact	20 - 40 ms
Load plate diameter	100 mm / 3.9‘‘, 150 mm / 5.9‘‘, 300 mm / 11.8‘‘ optionally 200 mm / 7.9‘‘
Measuring range of load cell	0 – 25.0 kN / 0 - 5.500 lbf
Accuracy of load cell	0.15 %
Sensor type	Geophone
Sensor range	0 – 2.2 mm
Power supply	Long-life rechargeable Lithium ion battery type Sony US 18650 VTC 6

Charging only by power pack type SYS1308-1809-W2E w. LEMO®-plug (9V/max. 2A), incl. in delivery

Number of geophones	Standard: 1 central geophone Optionally: 2 external geophones
Dimensions of transport box VENEZIA	800 x 400 x 350 mm / 31.2‘‘ x 23.6‘‘ x 40.25‘‘
Weight of transport box VENEZIA	Weight empty 19 kg / 41.8 lbs Total weight 58 kg / 127.6 lbs incl. complete set of accessories

3.4 AMBIENT CONDITIONS

The charging procedure should only be performed in dry indoor locations

Type of protection	IP53

The instrument should not be exposed to direct rainfall.

Temperature range	-10 to +40 °C
Maximum altitude	2.000 m
Max. rel. humidity	< 80%, no condensation

3.5 POWER SUPPLY

Power consumption in battery operation	typ. 3.6V DC/0.5A

3.6 BATTERY POWER

A long-life Lithium Ion rechargeable battery type Sony US 18650 VTC 6 3.6 Volt, 3.12 Ah is installed in the device.
The charging procedure takes ca. 4 to 5h depending on ambient temperature. Minimum ambient temperature amounts 0°C.

For charging, only the power pack in the standard delivery must be used. The charging socket, labelled with „Charger 9V/max 2A“ is located below the START button.

When switching ON the instrument, the charging state can be viewed by smartphone-App „TERRATEST 9000 LWD“. A complete charge corresponds to 3.6 Volt, usually sufficient for 300 measurements, depending on ambient temperature, battery lifetime and other influences.



ATTENTION
Never attempt to open the battery. Improper handling or short circuit may give rise to fire hazard.

Lithium is a highly reactive light metal, so that corresponding directives for transport and disposal must be observed. Also for this reason, the instrument or the battery itself should never be left to persons unaware of possible danger.

According to the Directive on Waste Electrical and Electronical Equipment (2002/95/EG), the battery and electronic components should not be disposed of with domestic waste. This product must be handed over to collection points provided, responsible for electrical and electric equipment. In some countries manufacturers of similar electronic equipment are bound to take back electronic waste. Due to potentially hazardous substances contained, improper handling or treatment may entail negative impacts on environment and human health. Disposing of electronic parts in an appropriate manner also contributes to an effective use of natural resources. For more information, consult local authorities.



TERRATEST LWD GmbH will take back electronic waste free of charge, and dispose of it in a safe and environmentally appropriate manner.

4 GENERAL OVERVIEW

4.1 INTRODUCTION

The „TERRATEST“- product family combines highly modern microelectronic components with the properties of an accurate ergonomic test instrument, which is extremely suitable for the use on construction sites.

4.2 INNOVATIONS

All „TERRATEST“- products have such outstanding, innovative features that they have become globally unique testing instruments for measuring bearing capacity:

4.2.1 Mechanical Innovations:

- Ergonomic, hexangular weight-catching grip of the falling weight for comfortable handling
- Angled load plate handles as a coupling to the mobile transport system „CARRELLO“
- Simple assembly/dismantling of the guide rod and the holding device for smartphone to ensure safe and space-saving transport

4.2.2 Electronic Innovations:

- Data transfer via Bluetooth®
- Safe connection by valuable plugs and sockets
- User-friendly, comfortable smartphone-App to record measurements
- Magic Eye to visualize the control

4.3 DYNAMIC LOAD PLATE TEST

The dynamic load plate test with the light weight deflectometer represents a test method during which the ground is subjected on an impact load (F max). This impact load is generated by a weight falling onto a load plate with defined diameter. The parameter for the deformability of the soil under this defined vertical impact load is the so called Emod value.

To ensure homogenous and repeatable results it is recommended to establish general procedures and directives before performing tests. The Danish institute for road construction defined in the year of 2006 guidelines for test, analysis and report in the form of an “approach for a preliminary test method”, summarized in the following.

In order to estimate layer thickness and determine non-linearity, each testing point should be measured in the layers with different plate sizes and load stages. For inspection of unbound material, the following values are recommended:

Granular base layers	29 - 44 psi / 200 - 300 kPa
Sub base layers	15 - 29 psi / 100 - 200 kPa
Solid subgrades	7 – 15 psi / 50 – 100 kPa
Soft subgrades	1,5 – 9 psi / 10 – 60 kPa

Settlements between 300 µm 2200 µm are preferred, the optimum range is between 500 µm and 1500 µm. Set the pulse duration of the impact to a value between 15 and 25 msec., the parameter can be adapted by four or three vibration dampers.

In order to ensure homogenous pressure distribution below the plate, a stable contact to the testing surface must be achieved. Disturbing objects like stones should be removed beforehand. For uneven

surfaces, it is recommended to cover the soil with a thin layer of sand to fill gaps. Position the plate on the surface in horizontal orientation, as accurately as possible.

In state of delivery, the central geophone is fixed by a cover screw, located centrally at the bottom of the load plate, to be removed by means of a coin or a flat screwdriver. Afterwards the tappet included in the delivery must firmly be bolted at that position.

Before releasing the falling weight, the geophone must be centered again. For that purpose unlock the transport security, pull it up, put it down again and reinsert the lock of the transport security in lowest position. Verify the values stored in the smartphone-App „TERRATEST 9000 LWD“, particularly with respect to the plate radius.

Between the tests, contamination of the device must be removed to ensure accurate results.

On very cohesive or moistened subsoil, perform measurement without making use of the tappet of the central geophone. To achieve this, fix the central geophone by means of the transport security in lowest position, and bolt the cover screw from below into the geophone.

4.4 Scope of Application

The dynamic load plate test with light weight deflectometer is suitable for testing the bearing capacity and assessing the compaction quality of unbound or partially bound soil for earthworks and road construction. ‘Soil’ should be understood as including backfill materials, base courses without binders, soil improvements, cold recycling layers, mineral sealing layers, asphalt and not yet cured concrete. The testing method is especially suitable for coarse-grained and mixed-grained soils with a maximum grain size of 63 mm.

4.5 Calibration

„TERRATEST 9000 LWD“ before delivery is calibrated acc. to manufacturer specification. During this procedure, all components are attuned specifically to one another. After completion, respective calibration tags with the expiry date are attached to the central geophone between transport security and electronics. A calibration certificate is provided as well. At least once per year, recalibration by TERRATEST LWD GmbH is required. Test results of a device that has not been calibrated or of a device with expired calibration date must not be used for evaluation of the bearing capacity of soil or rock. Prescribed calibration intervals therefore must be observed.

4.6 Rules for Proper Use

1. Remove any existing loose material from the test area; create a smooth and level surface on which to place the load plate. Ensure full and even contact between load plate and ground. In the case of soil irregularities, spread a thin layer of sand on the surface and reduce the thickness of the layer by moving the plate back and forth.
2. Before each measurement, the geophone has to be centered again, by shifting up and down the transport security.
3. A tight connection of the guide rod must be ensured. Therefore between the measurements, repeatedly check its screwing.
4. Grasp cables from the plug. Pulling the cable itself may result in damage to the wires.
5. Before each test, make sure that the bottom side of the plate is clean, and remove adhering coarse material.
6. The grain size of the material to be inspected is limited to max. 63 mm.

5 MEASUREMENT WITH „TERRATEST 9000 LWD“

5.1 PREPARING THE TESTING POINT

Place the load plate on the ground, ensuring full and even contact. Create a smooth and level surface on the area to be inspected, by moving the plate back and forth, or by means of auxiliary equipment, e.g. a trowel. Loose material (like stones) has to be removed. In the case of soil irregularities, spread a thin layer of fine-grain quartz sand on the surface. The sand is only intended to compensate for unevenness. Full and even contact is imperative. Attach the smartphone to its holding device.

5.2 TEST EXECUTION



Start App „TERRATEST 9000 LWD“ on the smartphone (refer to section 6.1, page 29). Switch ON the electronics by pressing green „Start“-button at the housing. The instrument first performs a self-test, to be recognized by the rapidly changing color of the control lamp of the „Magic Eye“. After completion, the color of the „Magic Eye“ changes to red. The Bluetooth connection to the smartphone can be established as follows:

In the smartphone app, press the red Bluetooth symbol with white background appearing in the lower left corner of the application, and in the displayed list select device „LWD9000“. When the connection is established, the color of the Bluetooth symbol background changes to Green, and the color of the „Magic Eye“ to Blue.

The desired falling height can be adjusted now. Loosen the eccentric clamp of the releasing device, select the height by displacing it and fix this position by stretching the clamp. To center the geophone again, draw off the transport security from the load cell, pull the security upward and let it fall again. Afterwards this transport security must be reattached in the lowest position by pressing it in.



Verify the values stored in the smartphone-App „TERRATEST 9000 LWD“, particularly with respect to the plate radius (chapter 6.3.3, page 43). With one hand, draw the falling weight upward and engage it in the releasing device, by pulling and releasing the green lever with the other hand. Now the falling weight is suspended in upper position.

The measuring mode is opened by pressing „Start Test“ button. Click on „Ready“ button to initiate measurement. The color of this button changes from Green to Red, and the buzzer on the smartphone activates. The control lamp of the „Magic Eye“ of the device is illuminated in Green, which shows that the system is ready to measure. Pull the green lever of the releasing device, and let the falling weight fall down onto the vibration dampers in free

fall. After impact the color of the control lamp of the „Magic Eye“ changes to Blue. Recorded data are transferred to the smartphone. When these data are successfully received and processed by the app, the buzzer sounds again, and the values are displayed on the smartphone.

The smartphone-App „TERRATEST 9000 LWD“ is described in detail in chapter 6, page 29ff.

Between the tests, contamination of the device must be removed to ensure accurate results.

On very cohesive or moistened subsoil, preferably perform measurement without making use of the tappet of the central geophone. To achieve this, the tappet can be fixed by engaging the transport security in upper position and attaching the cover.



ATTENTION
Damages issuing from improper handling may invalidate the warranty.



ATTENTION
During the entire test procedure, firmly hold the upper grip with one hand the upper. The device should never be left unattended with the weight engaged in upper position, as the system in this state is not stable and may tip over, giving rise to damage or injuries. Do not engage the falling weight in upper position before the test is immediately intended to be carried out. Persons not involved with the test procedure should not remain in direct vicinity. After impact, place the falling weight at the bottom onto the vibration dampers.

5.3 „MAGIC EYE“



The Bluetooth®-transmission unit of the measuring electronics features a „Magic Eye“ (transparent hemispherical cover over the transmitter), which can appear in five different colors.

5.3.1 „Magic Eye“ RED

After switching ON the measuring electronics by pressing the green button, the system first performs a self-test for a second, which can be recognized by the rapidly changing color of the control lamp of the „Magic Eye“. After completion, the electronics for a second signals the charging state of the Lithium ion battery by means of a white or yellow diode. White: Charging state above 20% of full capacity, yellow: Below that limit. Afterwards, the color of the „Magic Eye“ changes to red, showing that the electronics are ready for operation. In this state, the Bluetooth®-transmission unit of the measuring electronics waits for establishment of the connection to the smartphone app.

If in the course of the measurement, the color of the „Magic Eye“ changes to Red again, the connection between measuring electronics and smartphone is obviously interrupted. Their mutual distance meanwhile may be too large. The measurement is cancelled. Reduce this distance, and establish the mutual connection again. When the problem is solved, the voice output of the smartphone communicates „CONNECTED“.

5.3.2 „Magic Eye“ BLUE

As soon as the Bluetooth®- connection between smartphone-App and measuring electronics is established, the „Magic Eye“ is illuminated in Blue.

5.3.3 „Magic Eye“ GREEN

Green color of the „Magic Eye“ shows that both measuring electronics and smartphone-App are ready for measurement. At the end of the measurement, the color of the „Magic Eye“ returns to Blue which symbolizes the existing Bluetooth®-connection.

1.2.2 Deflectómetro de impacto liviano

1.2.2.1 Descripción

El deflectómetro de impacto liviano o LWD (por las siglas en inglés de Light Weight Deflectometer) es un instrumento portátil muy útil para la medición in situ de la capacidad de soporte y rigidez de la subrasante, subbase y capas delgadas construidas. Solo se necesita una persona para la operación del equipo que puede trabajar en condiciones muy difíciles y en áreas de acceso limitado.

El LWD es un equipo de alta precisión que permite la evaluación de la homogeneidad de la estructura antes de la colocación de la capa de rodadura (o capas superiores); además permite obtener por retrocálculo los parámetros de diseño en el momento de la medición. El LWD no requiere medidas de referencia y reemplaza las pruebas estáticas que son costosas y consumen tiempo, por lo que su uso es muy recomendado en vías afirmadas y no pavimentadas en donde el equipo determina los puntos de baja capacidad portante en la vía.

1.2.2.2 Componentes físicos

Para la medición de las deflexiones el equipo generalmente posee los siguientes componentes.

- Deflectómetro con celda de carga y sensor principal
- Vehículo de transporte
- Computador de mano
- Pesas adicionales
- Sensores adicionales
- Caja de transporte

1.2.2.3 Procedimiento de medición

El equipo trabaja con un sistema de medida de deflexión bajo carga por una fuerza de impacto transitoria enviada a la estructura; es decir, una masa es levantada a determinada altura y luego soltada sobre una placa circular amortiguadora en la estructura. Una fuerza de impulso transitoria se genera a causa de la caída de la masa y los desplazamientos verticales producidos en el pavimento son detectados por sensores situados a diferentes distancias del centro de aplicación de la carga. Es recomendable usar el equipo portátil de alta precisión para la evaluación de vías sin pavimentar, ya que miden in situ las propiedades de las capas de pavimento y de la subrasante.

Generalmente, se aplican tres golpes en cada punto de medición con una carga seleccionada de 15 kN aproximadamente y se emplea el plato de carga de 30 cm de diámetro. Se recomienda adicionar la viga perpendicular al LWD y apoyarla sobre la superficie de la vía para los dos sensores adicionales del equipo a fin de obtener de esta manera el cuenco de deflexiones.

1.2.2.4 Características del equipo

Las características generales del equipo son las mostradas en la **Tabla III.2**

Tabla III.2 Características del Deflectómetro de Impacto Liviano

Descripción	Especificación	Equipo
Peso del equipo	Aproximadamente 22 kg	
Diámetro del plato	100, 150, 200 y 300 mm (estándar)	
Peso de caída	10 (estándar), 15 y 20 kg	
Altura de caída	Máxima 850 mm	
Rango de carga	Mayor a 15 kN, pico de carga usando 20kg	
Tipo de carga	Esencialmente medio seno	
Duración del pulso	15 a 30 ms	
Rango de la celda	0 a 25 kN	
Exactitud de la celda	2% ± 2 kPa	
Precisión de la celda	0.0003 kN	
Cantidad de geófonos	Variable entre 1 y 3 sensores	
Posición de los geófonos	0, 250, 300 y 600 mm	
Rango de geófonos	0 a 2200 µm	
Frecuencia de muestreo	4 Hz en cada sensor	
Período de muestreo	60 a 120 ms	
Exactitud de geófonos	2% ± 2 µm	
Precisión de geófonos	0.1 µm	
Requerimientos PDA	Bluetooth, mínimo 32 Mb de memoria, Windows Mobile 2002, versión 5 o superior	
Parámetros de salida	Deflexión máxima, radio de curvatura, y módulo superficial	
(*) De preferencia se optara por la tecnología mas reciente		

1.2.2.5 Control de calidad

Condiciones de Medición

No se debe efectuar mediciones en las vías afirmadas o no pavimentadas bajo condiciones de precipitaciones debido a la saturación de las capas superficiales y al cambio de sus propiedades de resistencia, pero sobre todo por las condiciones de seguridad para el personal de medición.

Adicionalmente, es importante controlar la uniformidad del área de contacto entre el plato de carga y la superficie para garantizar la calidad de los resultados.

Calibración del Equipo

Para el equipo LWD corresponde un procedimiento de calibración de referencia o absoluta. Se recomienda que el equipo LWD sea calibrado con una frecuencia de dos años o cada 25 mil

golpes dados después de la última fecha de calibración. Es importante que todas las calibraciones del LWD se realicen por el fabricante.

Luego de realizada la calibración absoluta en el equipo, los resultados de las lecturas en la celda de carga y sensores de deflexión deben de ser registrados en el respectivo reporte de calibración, con la debida fecha y con la firma del representante autorizado por parte del fabricante.

Anexo E

Ensayos de laboratorio

INGEOTECON

GEOTECNIA CONCRETO Y PAVIMENTOS

"INGEOTECON, calidad en la ingeniería"

INGEOTECON ISO 9001:2015 CERTIFICADO

ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS EN LABORATORIO

INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26

PROYECTO

EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025

SOLICITANTE

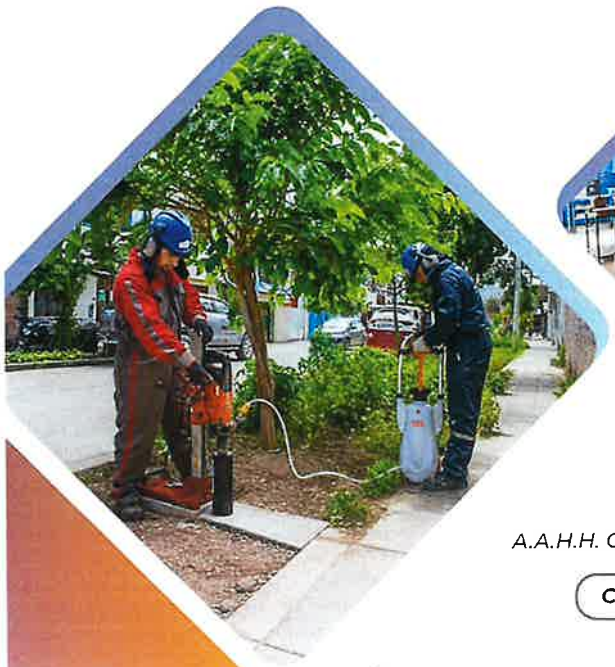
BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS

FECHA:

JUNIO DEL 2026

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134







A.A.H.H. Covadonga Mz. P2 Lote 8 - Ayacucho

Cel: *989 900 609 / 961 372 637*

www.ingeotecon.com

LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.

Método de ensayo: ASTM D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (versión 2017)

Proyecto*	: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025		
Ubicación*	: AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO	Lugar*	: AYACUCHO
Trazabilidad	: INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26	Exploración*	: CALICATA 01
Cliente*	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Estrato/Nivel*	: -.-
Contacto*	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Fecha de Informe:	: JUNIO DEL 2026

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Fecha de recepción: 2026-06-01	Fecha de inicio de ensayo: 2026-06-02
Lugar de ensayo: Laboratorio INGEOTECON zona de límites	Equipo para Límite Liquido: Manual
Procedimiento de ensayo: Método para Límite Líquido A (Multipunto)	Equipo para Límite Plástico: Manual
Tipo de ranurador usado LP: Plástico	Analista : K. Briceño

DE LA MUESTRA / ESPÉCIMEN

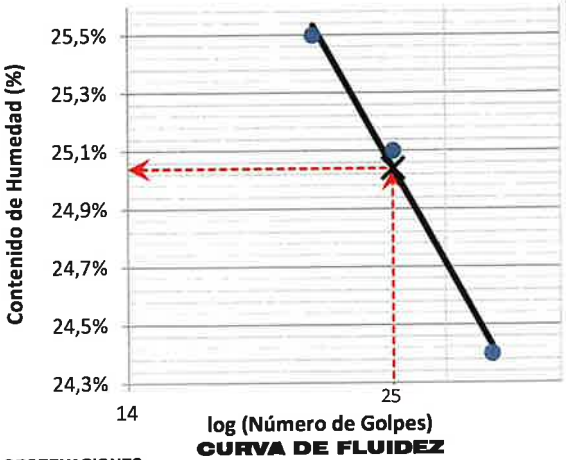
% aproximado retenido en la malla No. 40: 76 %	Condición de la muestra: Muestra alterada en bolsas MAB
Humedad de la muestra: 3 %	Remoción de lentes de arena : NO
Preparación de especímenes de ensayo: HUMEDO (>15 % Retenido No. 40)	Tamaño Máximo aproximado : 1 1/2 in.
Eliminación de partículas mayores a la malla No. 40: Eliminación por la malla No. 40 con Lavado.	

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE LOS SUELOS

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	ENSAYO 01	ENSAYO 02	
Masa del Suelo Húmedo	g	8,44	8,41	LÍMITE PLÁSTICO LP: 20
Masa del Agua en el espécimen	g	1,41	1,41	
Masa Seca del espécimen	g	7,03	7,00	
Humedad	%	20,1%	20,1%	

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PROCEDIMIENTO DE MULTIPUNTO			
Número de Golpes	golpes	31	25	21	LÍMITE LIQUIDO LL: 25
Masa del Agua en el espécimen	g	3,25	2,78	3,11	
Masa Seca del espécimen	g	13,33	11,08	12,21	
Humedad	%	24,4%	25,1%	25,5%	



CURVA DE FLUIDEZ

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO

ÍNDICE PLÁSTICO IP = LL-LP: 5

INGEOTECON E.I.R.L.
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N°334134

OBSERVACIONES

- (*) Son datos proporcionados por el cliente como: proyecto, ubicación, cliente, contacto, lugar, exploración, estrato/nivel y otros indicados. El Laboratorio no se responsabiliza por esta información, que pueda afectar la validez de los resultados.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos al ensayo.
- Los resultados reportados en el presente informe de ensayo se aplican a la muestra de acuerdo a las condiciones de como se recibió.
- Los resultados de los ensayos no deben ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- El informe de ensayo no podrá reproducirse en forma parcial, solo podrá reproducirse en su totalidad con la aprobación del Laboratorio.
- La muestra cumple con las condiciones del ensayo

LABORATORIO INGEOTECON EIRL; Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com;
Web: www.ingeotecon.com

GRADACIÓN DE PARTÍCULAS DE SUELOS MEDIANTE ANÁLISIS POR TAMIZADO.

Método: ASTM D6913/D6913M Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis (versión 2025)

Proyecto* : EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025

Ubicación* : AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO

Lugar* : AYACUCHO

Trazabilidad : INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26

Exploración* : CALICATA 01

Cliente* : BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS

Estrato/Nivel* : -.-

Contacto* : BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS

Fecha de Informe: : JUNIO DEL 2026

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Fecha de recepción de muestra: 2026-06-01

Fecha de inicio de ensayo: 2026-06-03

Condición de la muestra: Muestra alterada en bolsa MAB

Lugar de ensayo: Laboratorio INGEOTECON zona de Granulometría

Método de ensayo: A

Preparación inicial del espécimen de ensayo: Húmedo

Uso de equipo Agitador: SI

Uso de dispersante para lavado: NO

Litología predominante: Polimíctica

Forma : Sub Angulosa

Analista: M. Sánchez

DE LA MUESTRA

Ensayos previos de la muestra: No

Material excluido o zarandeado: Ninguno

Clasificación (Nombre y Símbolo): SC-SM (ARENA LIMO - ARCILLOSA CON GRAVA)

TM : 1 1/2 in.

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA

Tipo de Tamizado	Compuesto 1ra sep. CP	Compuesto 2da sep. CP	1er, 2do SubS/Simple
Tamiz de separación	19,0 mm	9,5 mm	-.-.-.-
Masa Seca (S,Md; 1nd; 2nd SubS,Md) (g)	14 023,9	1 669,74	346,2
Masa Seca Porc. Grue. (1nd; 2nd CP,Md) (g)	1 217,0	238,01	-.-.-.-
Masa Seca Lavada CP(1nd;2nd CPw,Md) (g)	-.-	-.-	-.-.-.-
Masa Húmeda (1nd FP,Mm; Espécimen) (g)	12 861,3	-.-.-.-	-.-
Humedad 1er FP (wfp) / Espécimen (wS)	0,4%	-.-.-.-	-.-.-.-
Masa Seca 1ra Porción Fina 1nd FP,Md (g)	12 806,8	-.-.-.-	-.-.-.-
Masa seca lavada (S;1nd;2nd SubSw,Md) (g)	-.-.-.-	-.-.-.-	285,2
Los finos lavados del CP se añadieron al FP	NO	NO	-.-.-.-

Control de pérdidas aceptables en el lavado y tamizado de la FG (CP).		
1ra Sep.	2da Sep.	FF/Conjunto Único
0,0%	0,0%	-.-.-.-
< = 0,5 %	<=0,5%	-.-.-.-
Control en el tamizado separador		
-.-	0,0%	0,0%
-.-	<=2 %	<=2 %

Tipo de Tamizado :

Compuesto de dos Separaciones

Designación Tamiz (E11)	Abertura (mm)	Masas retenidas (g)			Factor de Tamizado	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
		Tamizado FG 1ra Sep.	Tamizado FG 2da Sep.	Tamizado FF / Conjunto Único				
3 in.	75,000	-	-	-	0,007131	0,0	0,0	100
2 in.	50,000	-	-	-	0,007131	0,0	0,0	100
1 1/2 in.	37,500	-	-	-	0,007131	0,0	0,0	100
1 in.	25,000	745,2	-	-	0,007131	5,3	5,3	95
3/4 in.	19,000	470,6	-	-	0,007131	3,4	8,7	91
3/8 in.	9,500	-	238,0	-	0,054692	13,0	21,7	78
No. 4	4,750	-	-	69,1	0,226178	15,6	37,3	63
No. 10	2,000	-	-	89,7	0,226178	20,3	57,6	42
No. 20	0,850	-	-	51,7	0,226178	11,7	69,3	31
No. 40	0,425	-	-	28,6	0,226178	6,5	75,8	24
No. 60	0,250	-	-	16,6	0,226178	3,8	79,5	20
No. 100	0,150	-	-	11,0	0,226178	2,5	82,0	18
No. 140	0,106	-	-	10,7	0,226178	2,4	84,4	16
No. 200	0,075	-	-	6,7	0,226178	1,5	85,9	14
Fondo		1,2	-	1,0				

OBSERVACIONES

-.-

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

LABORATORIO INGEOTECON EIRL; Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com;
Web: www.ingeotecon.com

GRADACIÓN DE PARTÍCULAS DE SUELOS MEDIANTE ANÁLISIS POR TAMIZADO.

Método: ASTM D6913/D6913M Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis (versión 2025)

Proyecto* : EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025

Ubicación* : AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO
Lugar* : AYACUCHO

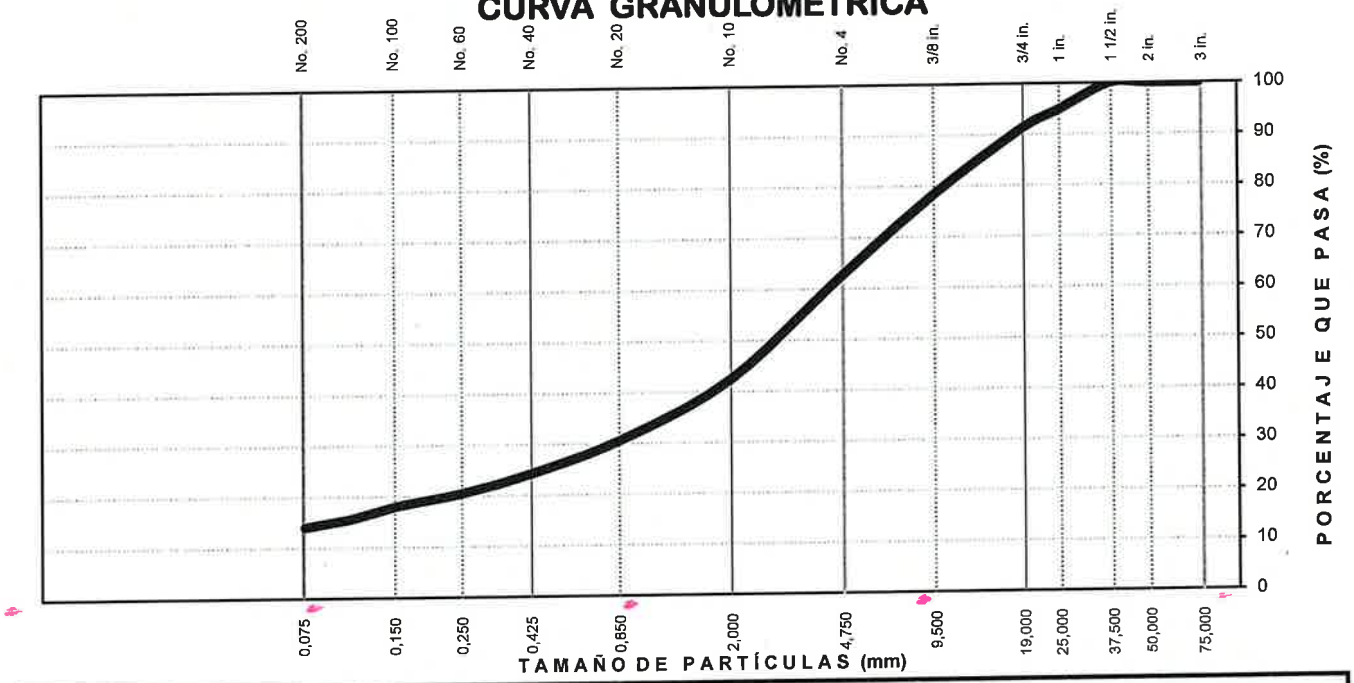
Trazabilidad : INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26
Exploración* : CALICATA 01

Cliente* : BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS
Estrato/Nivel* : -.-

Contacto* : BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS
Fecha de Informe: : JUNIO DEL 2026

GRÁFICO DE RESULTADOS

CURVA GRANULOMÉTRICA



VALORES DE RESULTADOS

$D_{10(mm)}$ = -.-
$D_{15(mm)}$ = 0,0943
TM = 1 1/2 in.

$D_{30(mm)}$ = 0,8038
$D_{50(mm)}$ = 3,0306

$D_{60(mm)}$ = 4,3861
$D_{85(mm)}$ = 14,3798

Cu = -.-

Cc = -.-

INGEOTECON E.I.R.L.
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N 334134

OBSERVACIONES :

- (*) Son datos proporcionados por el cliente como: proyecto, ubicación, cliente, contacto, lugar, exploración, estrato/nivel y otros indicados. El Laboratorio no se responsabiliza por esta información, que pueda afectar la validez de los resultados.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos al ensayo.
- Los resultados reportados en el presente informe de ensayo se aplican a la muestra de acuerdo a las condiciones de como se recibió.
- Los resultados de los ensayos no deben ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- El informe de ensayo no podrá reproducirse en forma parcial, solo podrá reproducirse en su totalidad con la aprobación del Laboratorio.

-.-

LABORATORIO INGEOTECON EIRL; Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com; Web: www.ingeotecon.com

LABORATORIO DE ENSAYO CON UN SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD ISO 9001:2015 CON NÚMERO DE CERTIFICADO ICO-SSGS-092025-6989-PE

Método de ensayo: ASTM D2487 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (versión 2025)

Método de ensayo: ASTM D3282 Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes (versión 2024)

Proyecto* : EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025

Ubicación* : **AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO**
Lugar* : **AYACUCHO**
Trazabilidad : **INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26**
Exploración* : **CALICATA 01**
Cliente* : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS**
Estrato/Nivel* : -.-
Contacto* : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS**
Fecha de Informe: : **JUNIO DEL 2026**

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Lugar de proceso: Oficina de Laboratorio | Responsable: J. Salcedo | Fecha de ejecución: : JUNIO DEL 2

ENSAYOS DE REFERENCIA: **Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos ASTM D4318 - Informe Código:**

Metodo de LL / LP: A (Multipunto) / Manual — Preparación de especímenes de ensayo: HUMEDO (<15 % Retenido No. 40)

Método utilizado : A — Preparación inicial del espécimen de ensayo: Húmedo

DE LA MUESTRA

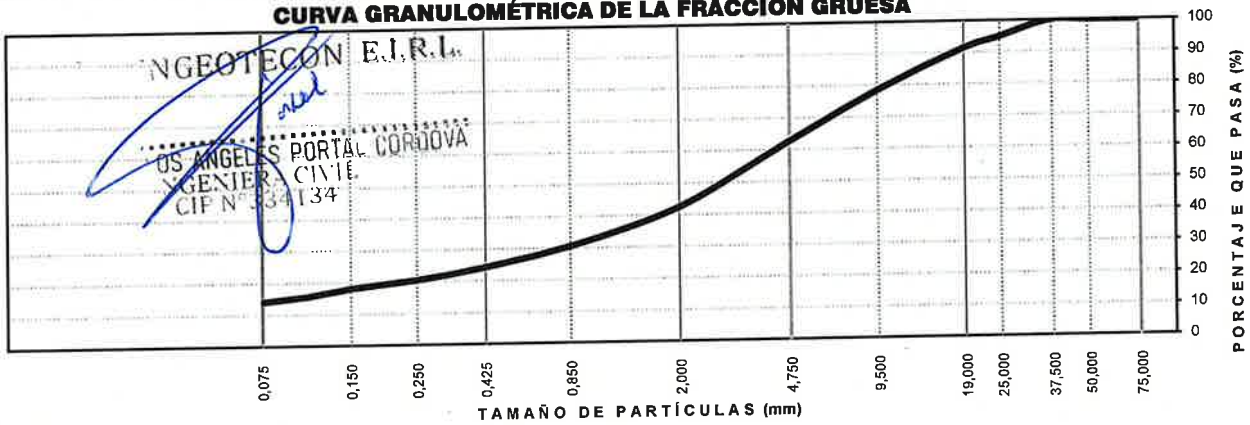
Nombre comercial/geológico: -.-

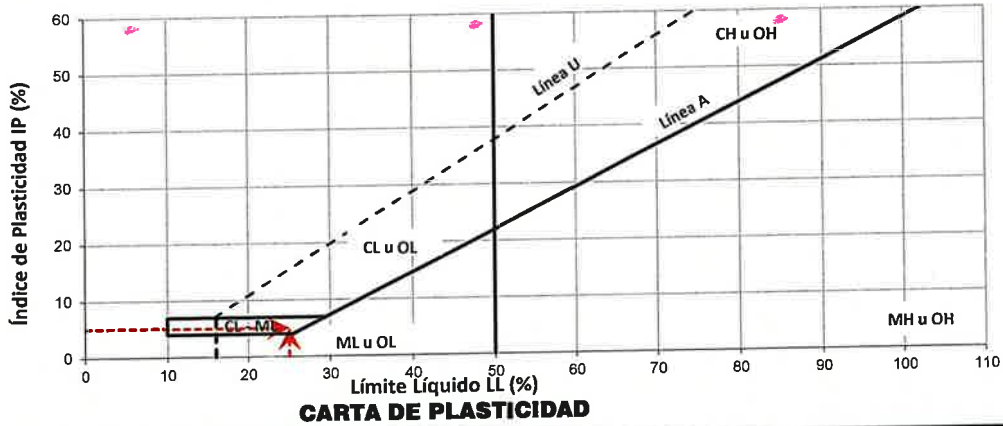
Boleos (3" a 12" en volumen) %: No reportado por solicitante

Bloques (> 12" en volumen) %: No reportado por solicitante

RESULTADOS DE ENSAYOS PRELIMINARES

CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA FRACCIÓN GRUESA





CARTA DE PLASTICIDAD

% Grava = 37,3
% Arena = 48,6
% de Finos = 14,1

%P: No. 10 = 42,4
%P: No. 40 = 24,2

Límite Liquido = 25
Límite Plástico = 20
Índice Plástico = 5

CLASIFICACIÓN DE SUELOS DEL MATERIAL PASANTE LA MALLA 3 In.

Clasificación de suelos y mezclas de suelo-agregado para propósitos de construcción de vías (AASHTO) :

A-1-a (0) **Fragmentos de Roca, Grava y Arena** — Clasific. Subrasante: Excelente a buena

Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS) :

SC-SM ARENA LIMO - ARCILLOSA CON GRAVA — Condición de frontera: NO

OBSERVACIONES

- (*) Son datos proporcionados por el cliente como: proyecto, ubicación, cliente, contacto, lugar, exploración, estrato/nivel y otros indicados. El Laboratorio no se responsabiliza por esta información, que pueda afectar la validez de los resultados.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos al ensayo.
- Los resultados reportados en el presente informe de ensayo se aplican a la muestra de acuerdo a las condiciones de como se recibió.
- Los resultados de los ensayos no deben ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- El informe de ensayo no podrá reproducirse en forma parcial, solo podrá reproducirse en su totalidad con la aprobación del Laboratorio.
- La traducción de los nombres al español de los métodos ASTM D2487 y ASTM D3282, están basados en la NTP 339.134 y NTP 339.135 respectivamente.

--- Fin del documento ---

LABORATORIO INGEOTECON EIRL: Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com; Web: www.ingeotecon.com

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO BAJO LA ENERGÍA DEL PROCTOR MODIFICADO.

Método de ensayo: ASTM D1557 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (2,700 kN-m/m³) (versión 2021)

Proyecto*	: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025		
Ubicación*	: AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO	Lugar*	: AYACUCHO
Trazabilidad	: INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26	Exploración*	: CALICATA 01
Cliente*	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Estrato/Nivel*	: -.-
Contacto*	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Fecha de Informe:	: JUNIO DEL 2026

INFORMACIÓN DEL ENSAYO

Analista: J. Yauri | Fecha de recepción: 2026-06-01 | Fecha de inicio de ensayo: 2026-06-04

Lugar de ensayo: Laboratorio INGEOTECON zona de Proctor | Condición del ítem: Muestra alterada en bolsa MAB

DE LA MUESTRA / ESPÉCIMEN

Clasificación SUCS (Muestra Original): SC-SM (ARENA LIMO - ARCILLOSA CON GRAVA) | Color: Pardo Claro

Contenido de humedad de muestra: 2 % | Gravedad específica (Gs)**: 2,65 | Método de determinación: Aproximado

Método de preparación del espécimen: Húmedo | Tamiz de separación usado: 3/8 in.

Fracción sobre tamaño (PC): 22 % | Fracción de Prueba (PF): 78 %

DEL ENSAYO DE COMPACTACIÓN

Método de compactación: B | Tipo de apisonador: Manual

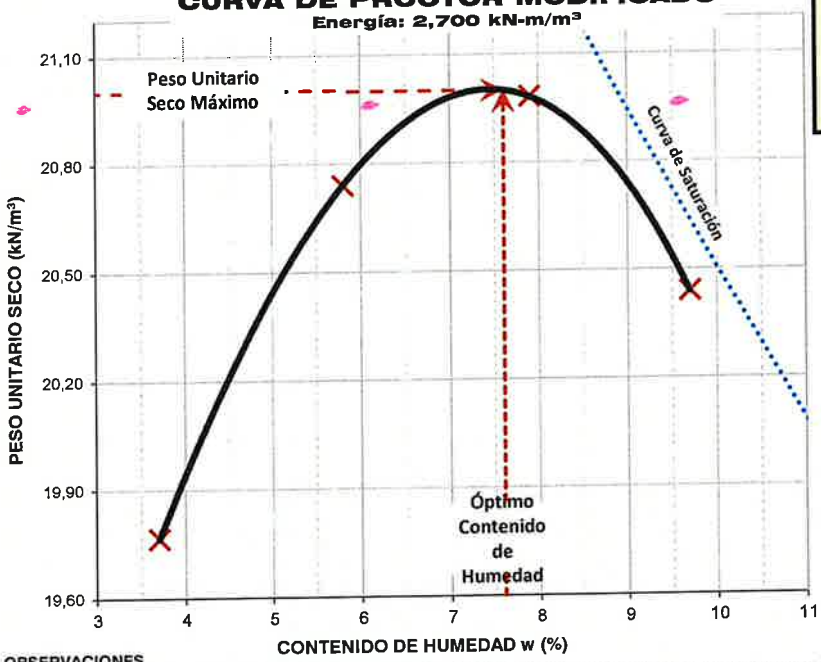
Punto de compactación		01	02	03	04	
Masa del sub espécimen	g	1 970	2 109	2 176	2 155	
Densidad húmeda	g/cm³	2,090	2,237	2,309	2,286	
Densidad seca	g/cm³	2,015	2,115	2,140	2,084	

DEL ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

Masa de suelo húmedo	g	540,1	602,7	605,8	694,5	
Masa del suelo seco	g	520,6	569,6	561,7	633,0	
Contenido de humedad	%	3,7	5,8	7,9	9,7	

OCH	MDS	PUSM
Óptimo Contenido de Humedad (%)	Máxima Densidad Seca (g/cm³)	Peso Unitario Seco Máximo (kN/m³)
7,6	2,141	21,00

CURVA DE PROCTOR MODIFICADO



INGEOTECON E.I.R.L.
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

OBSERVACIONES

- (*) Son datos proporcionados por el cliente como: proyecto, ubicación, cliente, contacto, lugar, exploración, estrato/nivel y otros indicados. El Laboratorio no se responsabiliza por esta información, que pueda afectar la validez de los resultados.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos al ensayo.
- Los resultados reportados en el presente informe de ensayo se aplican a la muestra de acuerdo a las condiciones de como se recibió.
- Los resultados de los ensayos no deben ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- El informe de ensayo no podrá reproducirse en forma parcial, solo podrá reproducirse en su totalidad con la aprobación del Laboratorio.
- ** Resultados de ensayos no acreditados.

--- Fin del documento ---

LABORATORIO INGEOTECON EIRL; Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com; Web: www.ingeotecon.com

Proyecto : EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025

Ubicación : **AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO** Lugar : **AYACUCHO**
Trazabilidad : **INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26** Exploración : **CALICATA 01**
Solicitante : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS** Estrato/Nivel : -.-
Atención : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS** Fecha Reporte : **JUNIO DEL 2026**

ESFUERZO AXIAL = 101,4 kPa

SUCS (muest ini): SC-SM (ARENA LIMO - ARCILLOSA CON GRAVA) AASHTO: A-1-a (0)
Estado : Remoldeado pasante malla de 1/2 in. Espesor Membrana (mm) : 0,600
Gs = 2,650 Velocidad ensayo mm/min: 0,150 Área después de consolidación (mm2) : 4007,07

Etapa	Inicial	Consol.	Final
Diámetro (mm) :	71,57	71,43	80,29
Altura (mm):	142,55	142,27	112,59
Humedad (%):	7,6%	-.-	10,6%
Densidad aparente (g/cm³):	2,18	-.-	
Densidad seca (g/cm³):	2,03	2,04	

Saturación Inicial % = 65,6 Área ini (mm2) : 4023,0
Saturación Final % = 93,8 Masa Solid (g): 1162,7
Datos de la saturación: Parámetro "B" = 96%
Datos iniciales antes del ensayo de compresión: Presión de Celda kPa = 208,4; Esfuerzo efectivo inicial kPa = 101,4; Presión de Poros inicial kPa = 110,6

Datos Corrida			Defor. axial	Área	Tensión desviadora			Tensiones principales			Trayectoria de tensiones	
ΔL (mm)	Fuerza axial (N)	Presión Poros (kPa)	ε (%)	A_a (mm2)	$(\sigma_1-\sigma_3)_m$ (kPa)	$\sigma_{mb}+\sigma_{dr}$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	σ_1 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	s' (kPa) (p')	t' (kPa) (q')
0,000	0,0	0,0	-	4 007,07	0,0	-	-	101,4	101,4	101,4	101,4	-
0,143	332,4	0,0	0,101	4 011,11	82,9	0,02	82,8	184,3	184,3	101,4	142,8	41,4
0,287	463,6	0,7	0,201	4 015,16	115,5	0,04	115,4	216,8	216,1	100,7	158,4	57,7
0,430	589,7	0,7	0,302	4 019,21	146,7	0,07	146,6	248,0	247,3	100,7	174,0	73,3
0,573	695,8	1,3	0,403	4 023,28	172,9	0,09	172,8	274,2	272,9	100,1	186,5	86,4
0,716	775,4	2,3	0,503	4 027,35	192,5	0,12	192,4	293,8	291,6	99,1	195,4	96,2
0,860	841,7	1,3	0,604	4 031,43	208,8	0,14	208,6	310,1	308,7	100,1	204,4	104,3
1,003	892,6	0,8	0,705	4 035,52	221,2	0,17	221,0	322,4	321,7	100,6	211,1	110,5
1,146	928,6	0,7	0,806	4 039,61	229,9	0,19	229,7	331,1	330,4	100,7	215,5	114,8
1,289	959,9	0,2	0,906	4 043,72	237,4	0,21	237,2	338,6	338,3	101,2	219,8	118,6
2,709	1116,9	-1,3	1,904	4084,85	273,4	0,44	273,0	374,4	375,7	102,7	239,2	136,5
4,129	1190,1	-1,9	2,902	4 126,83	288,4	0,66	287,7	389,1	391,1	103,4	247,2	143,9
5,548	1211,6	-2,1	3,900	4 169,68	290,6	0,86	289,7	391,1	393,2	103,5	248,4	144,9
6,968	1249,8	-3,3	4,898	4 213,43	296,6	1,05	295,6	397,0	400,3	104,7	252,5	147,8
8,387	1281,2	-4,4	5,895	4 258,10	300,9	1,23	299,7	401,1	405,4	105,8	255,6	149,8
9,807	1342,9	-7,9	6,893	4 303,74	312,0	1,39	310,6	412,0	419,9	109,3	264,6	155,3
11,227	1371,0	-8,6	7,891	4 350,36	315,1	1,55	313,6	415,0	423,6	110,0	266,8	156,8
12,646	1405,2	-10,1	8,889	4 398,00	319,5	1,71	317,8	419,2	429,4	111,5	270,5	158,9
14,066	1444,4	-9,5	9,887	4 446,70	324,8	1,85	323,0	424,4	433,9	110,9	272,4	161,5
15,486	1495,7	-12,6	10,885	4 496,49	332,6	1,99	330,6	432,0	444,6	114,0	279,3	165,3
16,905	1530,9	-12,9	11,882	4 547,41	336,7	2,13	334,5	435,9	448,9	114,4	281,6	167,3
18,325	1546,9	-13,8	12,880	4 599,49	336,3	2,27	334,1	435,5	449,3	115,2	282,2	167,0
19,744	1571,4	-16,5	13,878	4 652,79	337,7	2,41	335,3	436,7	453,3	117,9	285,6	167,7
21,164	1596,6	-16,8	14,876	4 707,33	339,2	2,54	336,6	438,0	454,8	118,2	286,5	168,3
22,584	1643,9	-16,5	15,874	4 763,16	345,1	2,68	342,4	443,9	460,3	117,9	289,1	171,2
24,003	1664,8	-16,8	16,872	4 820,33	345,4	2,83	342,5	444,0	460,7	118,2	289,4	171,3
25,423	1683,4	-17,2	17,869	4 878,90	345,0	2,97	342,1	443,5	460,7	118,6	289,7	171,0
26,842	1703,5	-17,6	18,867	4 938,90	344,9	3,12	341,8	443,2	460,8	119,0	289,9	170,9
28,262	1723,3	-18,0	19,865	5 000,40	344,6	3,28	341,4	442,8	460,7	119,4	290,1	170,7
29,682	1743,0	-18,4	20,863	5 063,45	344,2	3,44	340,8	442,2	460,6	119,8	290,2	170,4

INGEOTECON E.I.R.L.
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

INGEOTECON EIRL; Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com;
Web: www.ingeotecon.com

ENSAYO NORMALIZADO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO - NO DRENADO (CU)

Proyecto : **EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025**

Ubicación : **AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO** Lugar : **AYACUCHO**

Trazabilidad : **INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-0-021/OT-0183-26** Exploración : **CALICATA 01**

Solicitante : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS** Estrato/Nivel : **-.-**

Atención : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS** Fecha Reporte : **JUNIO DEL 2026**

ESFUERZO AXIAL = 198,4 kPa

SUCS (muest ini): SC-SM (ARENA LIMO - ARCILLOSA CON GRAVA) AASHTO: A-1-a (0)

Estado : Remoldeado pasante malla de 1/2 in. Espesor Membrana (mm) : 0,600

Gs = 2,650 Velocidad ensayo mm/min: 0,150 Área después de consolidación (mm2) : 4131,40

Etapa	Inicial	Consol.	Final
Diámetro (mm) :	71,58	72,53	81,84
Altura (mm):	142,26	138,30	108,62
Humedad (%):	7,6%	-.-	11,4%
Densidad aparente (g/cm³):	2,18	-.-	
Densidad seca (g/cm³):	2,03	2,03	

Saturación Inicial % = 66,0 Área ini (mm2) : 4024,5

Saturación Final % = 100,0 Masa Solid (g): 1162,6

Datos de la saturación: Parámetro "B" = 96%

Datos iniciales antes del ensayo de compresión: Presión de Celda kPa = 305,5; Esfuerzo efectivo inicial kPa = 198,4; Presión de Poros inicial kPa = 111,8

Datos Corrida			Defor. axial	Área	Tensión desviadora			Tensiones principales			Trayectoria de tensiones	
ΔL (mm)	Fuerza axial (N)	Presión Poros (kPa)	ε (%)	A_s (mm2)	$(\sigma_1-\sigma_3)_m$ (kPa)	$\sigma_{mb}+\sigma_{dr}$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	σ_1 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	s' (kPa) (p')	t' (kPa) (q')
0,000	0,0	0,0	-	4 131,40	0,0	-	-	198,4	198,4	198,4	198,4	-
0,143	358,6	-1,9	0,104	4 135,68	86,7	0,02	86,7	285,1	287,1	200,4	243,7	43,3
0,287	575,6	-1,7	0,207	4 139,97	139,0	0,04	139,0	337,4	339,1	200,2	269,6	69,5
0,430	812,6	-1,7	0,311	4 144,28	196,1	0,07	196,0	394,4	396,1	200,2	298,1	98,0
0,573	1080,1	-1,3	0,414	4 148,59	260,3	0,10	260,3	458,7	460,0	199,7	329,8	130,1
0,716	1361,3	-1,2	0,518	4 152,91	327,8	0,12	327,7	526,1	527,3	199,6	363,4	163,8
0,860	1636,7	-2,9	0,622	4 157,23	393,7	0,15	393,6	592,0	594,9	201,3	398,1	196,8
1,003	1905,8	-3,5	0,725	4 161,57	457,9	0,17	457,8	656,2	659,7	202,0	430,8	228,9
1,146	2134,3	-3,7	0,829	4 165,92	512,3	0,19	512,1	710,6	714,2	202,1	458,2	256,1
1,289	2346,0	-6,9	0,932	4 170,28	562,6	0,22	562,3	760,8	767,7	205,3	486,5	281,2
2,709	2550,5	-8,3	1,959	4 213,94	605,2	0,45	604,8	803,2	811,5	206,8	509,2	302,4
4,129	2627,1	-9,1	2,985	4 258,52	616,9	0,67	616,2	814,7	823,8	207,5	515,7	308,1
5,548	2657,5	-11,4	4,012	4 304,06	617,4	0,88	616,6	815,0	826,4	209,8	518,1	308,3
6,968	2708,0	-16,0	5,038	4 350,58	622,4	1,07	621,4	819,8	835,8	214,4	525,1	310,7
8,387	2701,7	-18,9	6,065	4 398,12	614,3	1,25	613,0	811,4	830,4	217,3	523,8	306,5
9,807	2700,9	-24,4	7,091	4 446,71	607,4	1,43	606,0	804,4	828,7	222,8	525,7	303,0
11,227	2735,4	-27,4	8,117	4 496,39	608,4	1,59	606,8	805,2	832,6	225,8	529,2	303,4
12,646	2755,6	-29,4	9,144	4 547,19	606,0	1,74	604,3	802,7	832,1	227,8	530,0	302,1
14,066	2723,6	-29,4	10,170	4 599,15	592,2	1,89	590,3	788,7	818,2	227,8	523,0	295,2
15,486	2704,7	-32,8	11,197	4 652,31	581,4	2,04	579,3	777,8	810,5	231,2	520,9	289,7
16,905	2676,7	-33,5	12,223	4 706,71	568,7	2,18	566,5	764,9	798,4	231,9	515,1	283,3
18,325	2661,3	-34,4	13,250	4 762,40	558,8	2,32	556,5	754,9	789,3	232,8	511,1	278,2
19,744	2636,4	-37,0	14,276	4 819,43	547,0	2,46	544,6	743,0	780,0	235,4	507,7	272,3
21,164	2623,8	-37,5	15,303	4 877,84	537,9	2,60	535,3	733,7	771,2	235,9	503,5	267,6
22,584	2607,2	-37,6	16,329	4 937,68	528,0	2,75	525,3	723,7	761,3	236,0	498,7	262,6
24,003	2575,1	-38,0	17,356	4 999,00	515,1	2,90	512,2	710,6	748,7	236,5	492,6	256,1
25,423	2542,5	-39,6	18,382	5 061,87	502,3	3,05	499,2	697,7	737,2	238,0	487,6	249,6
26,842	2471,6	-40,0	19,409	5 126,34	482,1	3,21	478,9	677,3	717,3	238,4	477,8	239,5
28,262	2400,6	-41,4	20,435	5 192,48	462,3	3,37	459,0	657,4	698,8	239,8	469,3	229,5
29,682	2329,6	-42,4	21,461	5 260,34	442,9	3,54	439,3	637,7	680,1	240,8	460,5	219,7

INGEOTECON E.I.R.L.

MARÍA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 234134

INGEOTECON EIRL; Dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 - Ayacucho; Tel: 066 318525; cel 961372637, 989900609; Correo: ingeotecon.comercial@gmail.com;
Web: www.ingeotecon.com

Proyecto : **EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025**

Ubicación : **AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO**
Lugar : **AYACUCHO**
Trazabilidad : **INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26**
Exploración : **CALICATA 01**
Solicitante : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS**
Estrato/Nivel : **-.-**
Atención : **BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS**
Fecha Reporte : **JUNIO DEL 2026**

ESFUERZO AXIAL = 300,2 kPa

SUCS (muest ini): SC-SM (ARENA LIMO - ARCILLOSA CON GRAVA)
AASHTO: A-1-a (0)
Estado : Remoldeado pasante malla de 1/2 in.
Espesor Membrana (mm) : 0,600
Gs = 2,650
Velocidad ensayo mm/min: 0,150
Área después de consolidación (mm2) : 4379,30

Etapa	Inicial	Consol.	Final
Diámetro (mm) :	71,56	74,67	83,79
Altura (mm):	141,95	137,34	109,08
Humedad (%):	7,6%	-.-	14,0%
Densidad aparente (g/cm³):	2,19	-.-	
Densidad seca (g/cm³):	2,04	1,93	

Saturación Inicial % = 66,9
Saturación Final % = 100,0
Área ini (mm2) : 4021,9
Masa Solid (g): 1163,0
Datos de la saturación: Parámetro "B" = 96%
Datos iniciales antes del ensayo de compresión:
Presión de Celda kPa = 410,6
Esfuerzo efectivo inicial kPa = 300,2
Presión de Poros inicial kPa = 113,3

Datos Corrida			Defor. axial	Área	Tensión desviadora			Tensiones principales			Trayectoria de tensiones	
ΔL (mm)	Fuerza axial (N)	Presión Poros (kPa)	ε (%)	A_s (mm2)	$(\sigma_1-\sigma_3)_m$ (kPa)	$\sigma_{mb}+\sigma_{dr}$ (kPa)	$\sigma_1-\sigma_3$ (kPa)	σ_1 (kPa)	σ'_1 (kPa)	σ'_3 (kPa)	s' (kPa) (p')	t' (kPa) (q')
0,000	0,0	0,0	-	4 379,30	0,0	-	-	300,2	300,2	300,2	300,2	-
0,143	429,1	-3,9	0,104	4 383,88	97,9	0,02	97,9	398,1	402,0	304,1	353,0	48,9
0,287	716,2	-4,8	0,209	4 388,46	163,2	0,05	163,2	463,4	468,1	305,0	386,5	81,6
0,430	989,8	-4,8	0,313	4 393,05	225,3	0,07	225,2	525,4	530,2	305,0	417,6	112,6
0,573	1286,9	-5,0	0,417	4 397,65	292,6	0,10	292,5	592,7	597,8	305,3	451,5	146,3
0,716	1578,8	-6,5	0,522	4 402,26	358,6	0,12	358,5	658,7	665,2	306,7	485,9	179,3
0,860	1829,8	-8,2	0,626	4 406,89	415,2	0,15	415,1	715,3	723,5	308,4	516,0	207,5
1,003	2073,9	-8,5	0,730	4 411,52	470,1	0,17	469,9	770,1	778,6	308,7	543,7	235,0
1,146	2302,1	-8,6	0,835	4 416,16	521,3	0,20	521,1	821,3	829,9	308,9	569,4	260,5
1,289	2505,2	-14,3	0,939	4 420,81	566,7	0,22	566,5	866,7	880,9	314,5	597,7	283,2
2,709	3621,0	-14,3	1,972	4 467,42	810,5	0,46	810,1	1 110,3	1 124,5	314,5	719,5	405,0
4,129	4039,7	-14,7	3,006	4 515,03	894,7	0,68	894,1	1 194,3	1 209,0	314,9	761,9	447,0
5,548	4146,3	-19,0	4,040	4 563,67	908,5	0,89	907,7	1 207,9	1 226,9	319,2	773,0	453,8
6,968	4108,3	-26,1	5,073	4 613,36	890,5	1,08	889,4	1 189,7	1 215,7	326,3	771,0	444,7
8,387	4069,6	-29,8	6,107	4 664,15	872,5	1,26	871,3	1 171,5	1 201,3	330,0	765,6	435,6
9,807	3997,4	-34,3	7,141	4 716,07	847,6	1,43	846,2	1 146,4	1 180,6	334,5	757,6	423,1
11,227	3931,4	-39,1	8,174	4 769,16	824,3	1,60	822,7	1 122,9	1 162,1	339,3	750,7	411,4
12,646	3879,8	-40,3	9,208	4 823,45	804,4	1,75	802,6	1 102,8	1 143,1	340,5	741,8	401,3
14,066	3854,0	-41,4	10,242	4 879,00	789,9	1,90	788,0	1 088,2	1 129,6	341,6	735,6	394,0
15,486	3877,2	-42,6	11,275	4 935,84	785,5	2,05	783,5	1 083,7	1 126,2	342,8	734,5	391,7
16,905	3903,0	-43,2	12,309	4 994,02	781,5	2,19	779,3	1 079,6	1 122,7	343,4	733,1	389,7
18,325	3977,1	-43,5	13,343	5 053,59	787,0	2,33	784,6	1 084,9	1 128,3	343,7	736,0	392,3
19,744	3962,7	-43,7	14,376	5 114,60	774,8	2,48	772,3	1 072,5	1 116,2	343,9	730,1	386,2
21,164	3976,0	-44,2	15,410	5 177,10	768,0	2,62	765,4	1 065,6	1 109,8	344,4	727,1	382,7
22,584	3935,4	-45,1	16,444	5 241,14	750,9	2,77	748,1	1 048,3	1 093,4	345,3	719,3	374,1
24,003	3930,8	-45,3	17,477	5 306,79	740,7	2,92	737,8	1 038,0	1 083,3	345,6	714,5	368,9
25,423	3917,1	-47,5	18,511	5 374,11	728,9	3,07	725,8	1 026,0	1 073,5	347,7	710,6	362,9
26,842	3903,5	-47,6	19,545	5 443,15	717,1	3,23	713,9	1 014,1	1 061,8	347,9	704,8	357,0
28,262	3889,8	-49,8	20,578	5 513,99	705,4	3,39	702,1	1 002,3	1 052,1	350,0	701,0	351,0

INGEOTECON E.I.R.L.

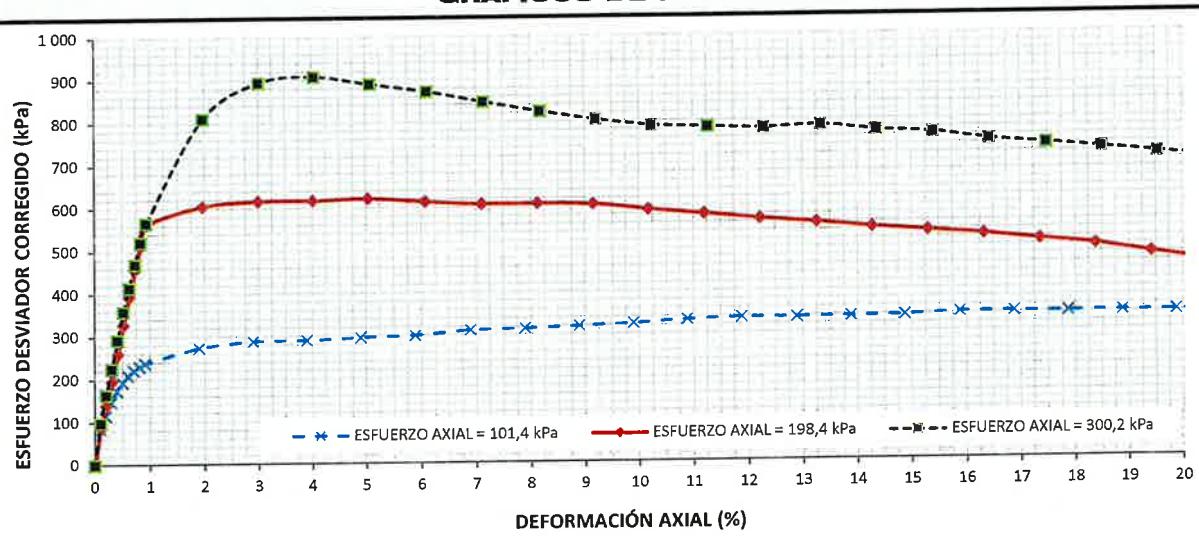
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERO CIVIL
CIP N° 334134

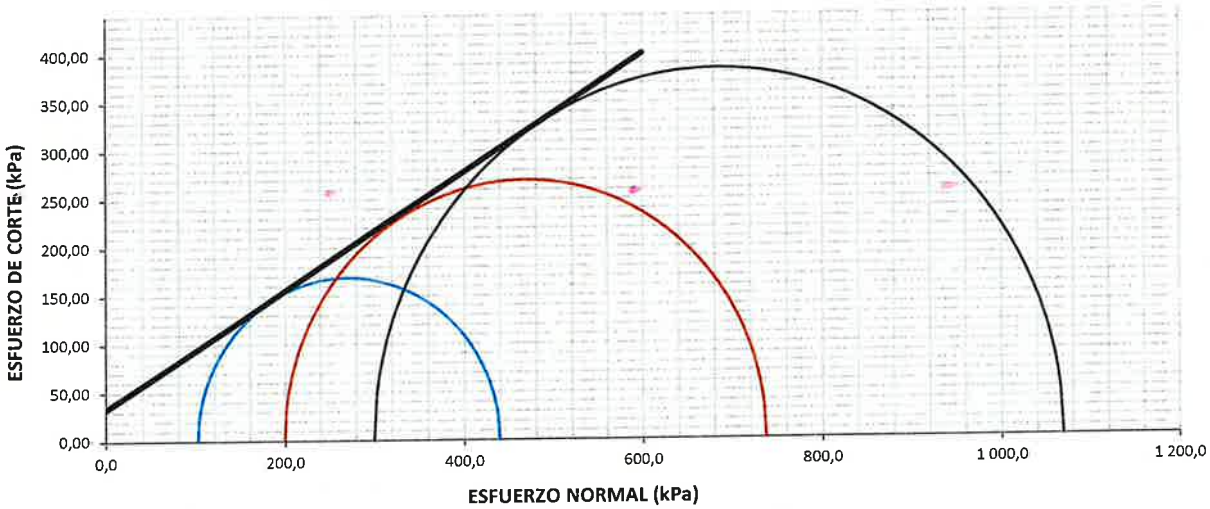
INFORME DE ENSAYO
STANDARD TEST METHOD FOR CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL COMPRESSION TEST FOR COHESIVE SOILS.
(ASTM D 4767, Compl. UNE-EN ISO 17892-9)

ENSAYO NORMALIZADO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL CONSOLIDADO - NO DRENADO (CU)

Proyecto	: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025		
Ubicación	: AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO	Lugar	: AYACUCHO
Trazabilidad	: INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26	Exploración	: CALICATA 01
Solicitante	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Estrato/Nivel	: -.-
Atención	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Fecha Reporte	: JUNIO DEL 2026

GRÁFICOS DE RESULTADOS





CIRCULO DE MOHR DE ESFUERZOS TOTALES

Ángulo de fricción interna total CU - ϕ_{cu} (°) : 31,5 **Cohesión total CU - C (kPa) : 33**

ESTADOS EN LA CONDICIÓN DE FALLA

ESPÉCIMEN	ESFUERZO PRINCIPAL MENOR (kPa)	ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR (kPa)	ESFUERZO DESVIADOR (kPa)	PRESIÓN DE PORO (kPa)	DEFORMACIÓN EN LA FALLA (%)	MODULO ELÁSTICO Ecu (kN/m2)
A	101,41	438,75	337,35	0,00	15,00	42168
B	198,42	736,45	538,03	0,00	15,00	61140
C	300,21	1068,34	768,12	0,00	15,00	69830

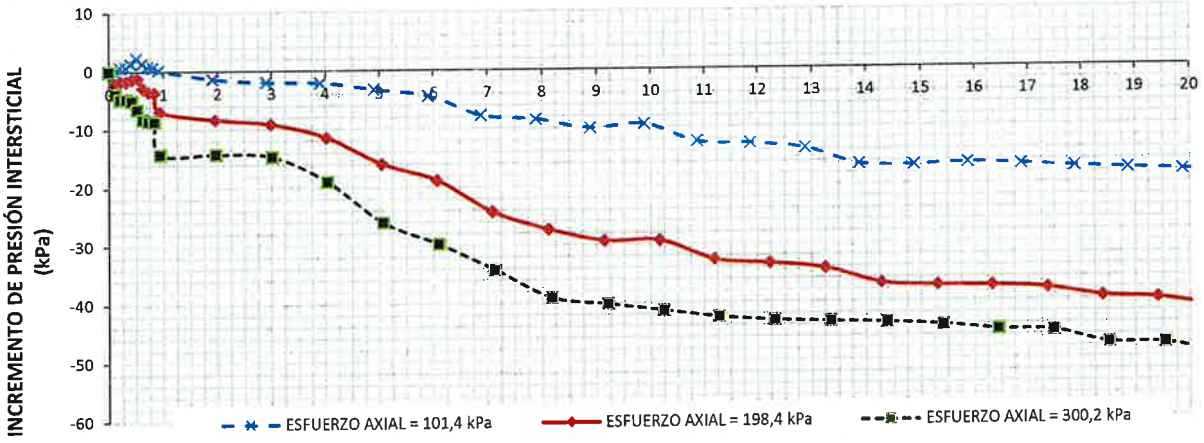
INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 384134

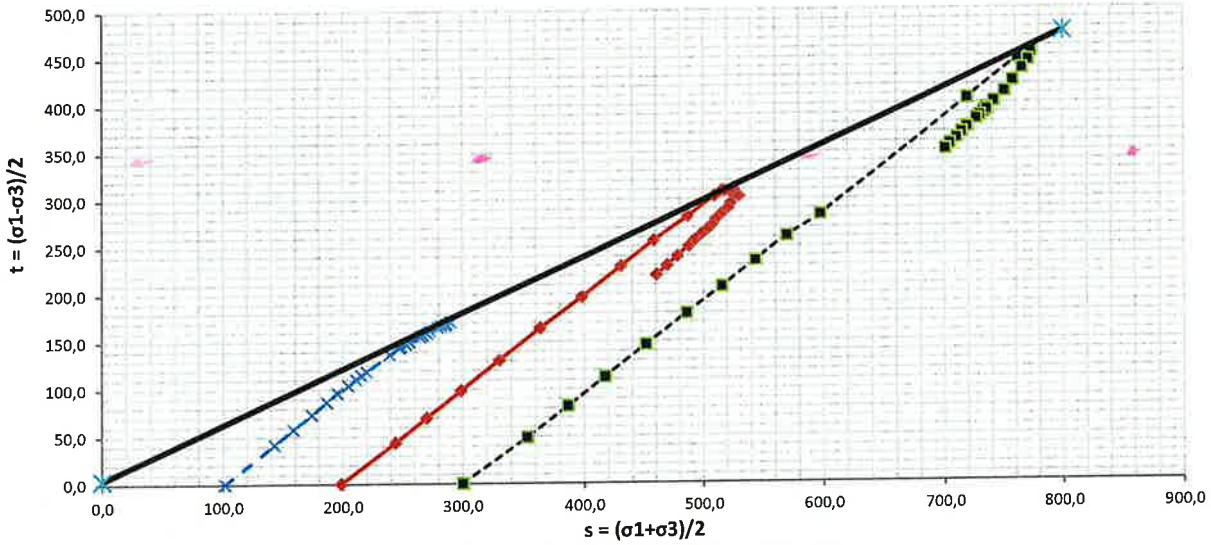
INGEOTECON EIRL, dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 Ayacucho, Tel: 066 318525, cel 961372637, 989900609, Correo: ingeotecon.vportalq@gmail.com. Web: www.ingeotecon.com

Proyecto	: EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025		
Ubicación	: AYACUCHO - HUAMANGA - AYACUCHO	Lugar	: AYACUCHO
Trazabilidad	: INF. N° 001-2026/ING-LAB-26-O-021/OT-0183-26	Exploración	: CALICATA 01
Solicitante	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Estrato/Nivel	: -.-
Atención	: BACH. JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS	Fecha Reporte	: JUNIO DEL 2026

GRÁFICOS DE RESULTADOS



PRESIONES INTERSTICIALES



TRAYECTORIA DE TENSIONES (M.I.T.)

Ángulo α' (°) : 30,5	a' (kPa) : 4,1
Ángulo de Fricción Efectiva ϕ' °: 36,1	**Cohesión Efectiva C' (kPa) : 5,07**

INGEOTECON E.I.R.L.
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

INGEOTECON EIRL, dirección: A.H. Covadonga Mz P2 Lt 8 Ayacucho, Tel: 066 318525, cel 961372637, 989900609, Correo: ingeotecon.vportalq@gmail.com. Web: www.ingeotecon.com



INGEOTECON

GEOTECNIA CONCRETO Y PAVIMENTOS

"INGEOTECON, Calidad en la Ingeniería"

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

PANEL FOTOGRÁFICO

A.A.H.H. Covadonga Mz. P2 Lote 8 - Ayacucho

Cel: *989 900 609 / 961 372 637*

www.ingeotecon.com



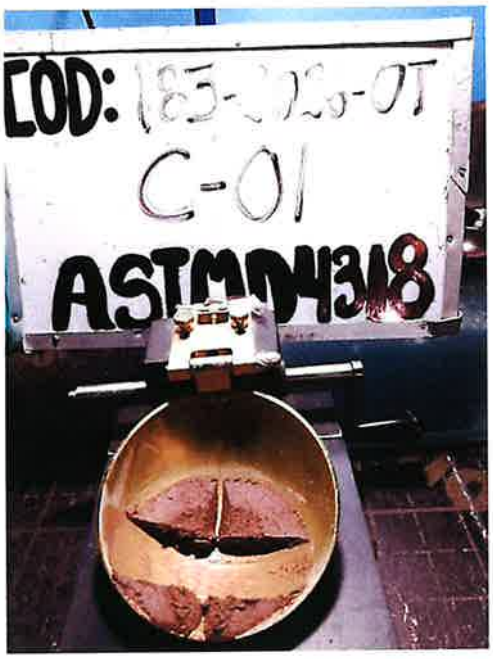
VISTA DE ALGUNOS ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA DE SUELOS



VISTA DE ALGUNOS ENSAYOS DE PROCTOR MODIFICADO

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134



VISTA DE ALGUNOS ENSAYOS DE LÍMITES



VISTA DE ALGUNOS ENSAYOS DE TRIAXIAL CU



VISTA DE ALGUNOS ENSAYOS DE TRIAXIAL CU



VISTA DE ALGUNOS ENSAYOS DE TRIAXIAL CU

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134



INGEOTECON

GEOTECNIA CONCRETO Y PAVIMENTOS

"INGEOTECON, Calidad en la Ingeniería"

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N°334134

CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN

A.A.H.H. Covadonga Mz. P2 Lote 8 - Ayacucho

Cel: *989 900 609 / 961 372 637*

www.ingeotecon.com

PINZUAR
LABORATORIO DE METROLOGÍA

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO No LC-079

INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Calibración Acreditado
Registro N°LC - 079

Certificado de Calibración - Laboratorio de Masa y Balanzas

M-01236-010 R0

Calibration Certificate - Mass and Weighing Instruments Laboratory

Equipo *Instrument*	INSTRUMENTO DE PESAJE NO AUTOMÁTICO
Fabricante *Manufacturer*	OHAUS
Modelo *Model*	AX8201/E
Número de serie *Serial Number*	B904149789
Identificación interna *Internal Identification*	BLZ-019
Carga máxima *Maximum load*	8200 g
Solicitante *Customer*	INGEOTECON CONTRATISTAS Y EJECUTORES E.I.R.L.
Dirección *Address*	AAHH COVADONGA MZ P2 LOTE 08
Ciudad *City*	AYACUCHO
Fecha de calibración *Date of calibration*	2026 – 01 – 26
Fecha de emisión *Date of issue*	2026 – 02 – 03

Los resultados emitidos en este certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo corresponden al ítem que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.

Este certificado de calibración documenta y asegura la trazabilidad de los resultados reportados a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

El usuario es responsable de la calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.

The results issued in this certificate relates to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates on page number one. The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.

This calibration certificate documents and ensures the traceability of the reported results to national and internationals standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The user is responsable for recalibrating the measuring instruments at appropriate time intervals.

Número de páginas del certificado, incluyendo anexos 04
Number of pages of the certificate and documents attached

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología PINZUAR LTDA no se puede reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que las partes del certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety since it provides the security that the parts of the certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.

INGEOTECON E.I.R.L.

Firmas que autorizan el certificado *(certificado firmado digitalmente)*
Signatures Authorizing the Certificate (digitally signed certificate)

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

Ing. Sergio Iván Martínez
Director Laboratorio de Metrología

Felix Jaramillo Castillo
Metrólogo Laboratorio de Metrología

Certificado firmado digitalmente

LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR LTDA.
Fuerza · Longitud · Masa · Temperatura
Calle Ricardo Palma No. 998 Urb. San Joaquín - Bellavista - Callao (+51 1) 562 1263 · www.pinzuar.com.co

Certificado de Calibración - Laboratorio de Temperatura

Calibration Certificate - Temperature Laboratory

T–00743-005 R0

Equipo *Instrument*	HORNO
Fabricante *Manufacturer*	PINZUAR
Modelo *Model*	PG-2004
Número de Serie *Serial Number*	119
Identificación Interna *Internal Identification*	HRN-002
Intervalo de Indicación *Indication Range*	10 °C a 200 °C
Intervalo del Controlador *Controller Range*	30 °C a 200 °C
Solicitante *Customer*	INGEOTECON CONTRATISTAS Y EJECTURORES E.I.R.L.
Dirección *Address*	AAHH COVADONGA MZ P2 LOTE 08
Ciudad *City*	AYACUCHO - HUAMANGA
Ubicación del Equipo *Place of the instrument*	ZONA DE SECADO
Fecha de Calibración *Date of calibration*	2025-02-06
Fecha de Emisión *Date of issue*	2025-02-13

Los resultados emitidos en este certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo coresponden al item que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.Este certificado de calibración documenta y asegura la trazabilidad a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

El usuario es responsable de la calibración de los intrumentos en apropiados intervalos de tiempo.

The results issued in this certificate relates to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates on page number one. The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the costumer.This calibration certificate documents and ensures the traceability to national and internationals standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The user is responsable for recalibrating the measuring instruments at appropriate time intervals.

Número de páginas del certificado, incluyendo anexos 07
Number of pages of the certificate and documents attached

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología Pinzuar Ltda. no se puede resproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que las partes del certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since it provides the security that the parts of the certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.

Firmas Autorizadas
Authorized signatureS

Ing. Sergio Martinez
Director del Laboratorio-Pinzuar Ltda Sucursal del Perú

Felix Jaramillo Castillo
Metrólogo-Pinzuar Ltda Sucursal del Perú

INGEOTECON E.I.R.L.

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N°334134

LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR LTDA.
Fuerza · Longitud · Masa · Temperatura
Calle Ricardo Palma No. 998 Urb. San Joaquín - Bellavista - Callao (+51 1) 562 1263 · www.pinzuar.com.co

PINZUAR
LABORATORIO DE METROLOGÍA

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO No LC-079

INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Calibración Acreditado
Registro N°LC - 079

Certificado de Calibración - Laboratorio de Masa y Balanzas

M-01236-005 R0

Calibration Certificate - Mass and Weighing Instruments Laboratory

Equipo *Instrument*	INSTRUMENTO DE PESAJE NO AUTOMÁTICO
Fabricante *Manufacturer*	OHAUS
Modelo *Model*	R31P30
Número de serie *Serial Number*	8337280275
Identificación interna *Internal Identification*	BLZ-012
Carga máxima *Maximum load*	30000 g
Solicitante *Customer*	INGEOTECON CONTRATISTAS Y EJECUTORES E.I.R.L.
Dirección *Address*	AAHH COVADONGA MZ P2 LOTE 08
Ciudad *City*	AYACUCHO
Fecha de calibración *Date of calibration*	2026 – 01 – 27
Fecha de emisión *Date of issue*	2026 – 02 – 03

Los resultados emitidos en este certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo corresponden al ítem que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.

Este certificado de calibración documenta y asegura la trazabilidad de los resultados reportados a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

El usuario es responsable de la calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.

The results issued in this certificate relates to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates on page number one. The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.

This calibration certificate documents and ensures the traceability of the reported results to national and internationals standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The user is responsable for recalibrating the measuring instruments at appropriate time intervals.

Número de páginas del certificado, incluyendo anexos 04
Number of pages of the certificate and documents attached

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología PINZUAR LTDA no se puede reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que las partes del certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since provides the security that the parts of the certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.

INGEOTECON E.I.R.L.

Firmas que autorizan el certificado *(certificado firmado digitalmente)*
Signatures Authorizing the Certificate (digitally signed certificate)

MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N° 334134

Ing. Sergio Iván Martínez
Director Laboratorio de Metrología

Felix Jaramillo Castillo
Metrólogo Laboratorio de Metrología

Certificado firmado digitalmente

LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR LTDA.
Fuerza · Longitud · Masa · Temperatura
Calle Ricardo Palma No. 998 Urb. San Joaquín - Bellavista - Callao (+51 1) 562 1263 · www.pinzuar.com.co

LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR LTDA.
Calle Ricardo Palma No. 998 Urb. San Joaquín - Bellavista - Callao
(+51 1) 562 1263 Cel: 986 654 547 - 943 827 118
www.pinzuar.com.co

PINZUAR®
LABORATORIO DE METROLOGÍA

Certificado de calibración

Calibration Certificate

NA-00326-001 R1

Equipo *Instrument*	CAZUELA CASAGRANDE ANALÓGICO MANUAL
Fabricante *Manufacturer*	PINZUAR
Modelo *Model*	S020604
Número de Serie *Serial Number*	2347
Identificación Interna *Internal Identification*	No presenta
Solicitante *Customer*	INGEOTECON CONTRATISTAS Y EJECUTORES E.I.R.L.
Dirección *Address*	MZA. P2 LOTE. 8 A.H. COVADONGA AYACUCHO
Ciudad *City*	HUAMANGA - AYACUCHO
Fecha de Calibración *Date of calibration*	2024 – 02 – 28
Fecha de Emisión *Date of issue*	2024 – 03 – 07

Los resultados emitidos en este Certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo corresponden al ítem que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.

Este Certificado de Calibración documenta y asegura la trazabilidad de los resultados a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

El usuario es responsable de la Calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.

The results issued in this Certificate relates to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates on page number one. The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.

This Calibration Certificate documents and ensures the traceability of the reported results to national and internationals standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The user is responsable for Calibration the measuring instruments at appropriate time intervals.

Número de páginas del certificado, incluyendo anexos 03
Number of pages of the certificate and documents attached

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología Pinzuar no se puede reproducir el Certificado, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que las partes del Certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since it provides the security that the parts of the Certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.

Firmas que Autorizan el Certificado
Signatures Authorizing the Certificate

Ing. Felix Jaramillo Castillo
Metrologo - PINZUAR LTDA SUCURSAL DEL PERU

INGEOTECON E.I.R.L.
MARIA DE LOS ANGELES PORTAL CORDOVA
INGENIERA CIVIL
CIP N°334134

Certificado de Calibración - Laboratorio de Fuerza

F-01236-016 R0

Calibration Certificate - Laboratory of Force

Equipo *Instrument*	MÁQUINA PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL
Fabricante *Manufacturer*	ELE INTERNACIONAL
Modelo *Model*	DIGITAL TRITEST 50
Número de Serie *Serial Number*	1884-5-1743 // 479878
Identificación Interna *Internal Identification*	PTX-001
Capacidad Máxima *Maximum Capacity*	8500 N
Solicitante *Customer*	INGEOTECON CONTRATISTAS Y EJECUTORES E.I.R.L.
Dirección *Address*	AAHH COVADONGA MZ P2 LOTE 08
Ciudad *City*	AYACUCHO
Fecha de Calibración *Date of calibration*	2026 – 01 – 27
Fecha de Emisión *Date of issue*	2026 – 02 – 03

Número de páginas del certificado, incluyendo anexos 04
Number of pages of the certificate and documents attached

Los resultados emitidos en este Certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. Dichos resultados solo corresponden al ítem que se relaciona en esta página. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o de la información suministrada por el solicitante.

Este Certificado de Calibración documenta y asegura la trazabilidad de los resultados a patrones nacionales e internacionales, que reproducen las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

El usuario es responsable de la Calibración de los instrumentos en apropiados intervalos de tiempo.

The results issued in this Certificate relates to the time and conditions under which the measurements. These results correspond to the item that relates on page number one. The laboratory, which will not be liable for any damages that may arise from the improper use of the instruments and/or the information provided by the customer.

This Calibration Certificate documents and ensures the traceability of the reported results to national and internationals standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The user is responsable for Calibration the measuring instruments at appropriate time intervals.

Sin la aprobación del Laboratorio de Metrología Pinzuar no se puede reproducir el Certificado, excepto cuando se reproduce en su totalidad, ya que proporciona la seguridad que las partes del Certificado no se sacan de contexto. Los certificados de calibración sin firma no son válidos.

Without the approval of the Pinzuar Metrology Laboratory, the report can not be reproduced, except when it is reproduced in its entirety, since it provides the security that the parts of the Certificate are not taken out of context. Unsigned calibration certificates are not valid.

Firmas que Autorizan el Certificado ***(Certificado Firmado Digitalmente)***
Signatures Authorizing the Certificate *(Digitaly Signed Certificate)*

Ing. Sergio Iván Martínez
Director Laboratorio de Metrología

Br. Felix Jaramillo Castillo
Metrólogo Laboratorio de Metrología

LABORATORIO DE METROLOGÍA PINZUAR LTDA.
Fuerza · Longitud · Masa · Temperatura
Calle Ricardo Palma No. 998 Urb. San Joaquín - Bellavista - Callao (+51 1) 562 1263 · www.pinzuar.com.co

INGEOTECON
GEOTECNIA CONCRETO Y PAVIMENTOS

RESULTADOS DE ENSAYOS DE IMPACTO LIGERO - LWD

INF. Nº 001-2026/ING-CON-26-O-003/INGEOTECON-208-26

PROYECTO:

"EVALUACIÓN NUMÉRICA DE LAS DEFORMACIONES POR SOLICITACIONES DE CARGAS VEHICULARES APLICADO EN RELLENOS ESTRUCTURALES, AYACUCHO 2025"

INGEOTECON E.I.R.L.
PORTAL ESPINO JARED FERNANDO
INGENIERO CIVIL
CIP: 342455

SOLICITANTE:

Bach. Jhon Kenyi Espinoza Barrientos

FECHA:

JUNIO DEL 2026



989 900 609 - 961 372 637
A.H. Covadonga Mz P2 lote 8
www.ingeotecon.com

INGEOTECON GEOTECNIA, CONCRETO Y PAVIMENTOS	Consultorías y Ensayos de Campo	Código: INF-CON-01
	INFORME	Versión: 01
	RESULTADOS DE DEFLECTOMETRO DE IMPACTO LIGERO - LWD	Fecha: 2021-08-23
	(M.MMP.1.16/20)	Número de paginas: 1

Proyecto : **"Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025"**

Ubicación : **Carretera vecinal EMP. AY-780 (Mollepata) – EMP. PE-3S (Pongora)** Lugar : **Carretera vecinal** Trazabilidad : **INF. Nº 001-2026/ING-CON-26-O-003/INGEOTECON-208-26**

Solicitante : **Bach. Jhon Kenyi Espinoza Barrientos** Fecha de Reporte : **JUNIO 2026**

Diámetro plato ensayo (mm): 300

Coeficiente de Poisson v : 0,3 Factor de distribución esfuerzos A : 2,00

Nro.	Ubicación de Ensayo en Campo Prog:	Referencia	Fuerza (kN)	Fuerza Promedio F (N)	Presión (kPa)	Geófono 0 (Central)				
						Deflexión Individual δ_0 (mm)	Coef. de Variación C.V. (%)	Cumple CV<10%	Deflexión Promedio δ_0 (mm)	Modulo de Rigidez de Superficie en Campo $E_{0\,LWD}$ (MPa)
1	KM 7+618	A 0,50m del muro	9,127	9119	129,0	0,446	1,77	Cumple	0,4397	**125,8**
			9,099			0,442				
			9,131			0,431				
2	KM 7+618	A 1,50m del muro	9,193	9193	130,0	0,446	0,67	Cumple	0,4460	**125,0**
			9,193			0,443				
			9,192			0,449				
3	KM 7+618	A 3,30m del muro	9,134	9134	129,2	0,433	1,62	Cumple	0,4330	**128,0**
			9,087			0,440				
			9,180			0,426				
4	KM 7+615	A 1,50m del muro	9,205	9214	130,4	0,316	1,19	Cumple	0,3177	**176,0**
			9,229			0,315				
			9,209			0,322				
5	KM 7+615	A 3,30m del muro	9,231	9199	130,1	0,354	2,07	Cumple	0,3567	**156,5**
			9,190			0,365				
			9,176			0,351				
6	KM 7+620	Terraplen	9,224	9197	130,1	0,380	1,48	Cumple	0,3847	**145,0**
			9,157			0,391				
			9,210			0,383				
7	KM 7+620	Terraplen	9,194	9179	129,9	0,506	3,26	Cumple	0,4877	**114,2**
			9,178			0,478				
			9,165			0,479				
8	KM 1+050	A 1,50m del muro	8,605	8488	120,1	0,587	0,64	Cumple	0,5913	**87,1**
			8,450			0,593				
			8,408			0,594				
9	KM 1+650	Terraplen	8,207	8145	115,2	0,880	1,64	Cumple	0,8960	**55,2**
			8,023			0,899				
			8,206			0,909				
10	KM 1+650	Terraplen	8,080	8155	115,4	0,890	1,99	Cumple	0,8710	**56,8**
			8,120			0,867				
			8,265			0,856				

INGEOTECON E.I.R.L.
PORTAL ESPINOZA REYNALDO FERNANDO
INGENIERO CIVIL
CIP. 242655

INGEOTECON	LABORATORIO	Código F-LAB-194
GEOTECNIA, CONCRETO Y PAVIMENTOS	FORMATO	Versión 01
	VERIFICACION DE EQUIPO LWD	Fecha 2023-06-10
		Página 2 de 1

N° INFORME: INF-LAB- LWD-001-1-2026

FECHA 2026-03-18

1. CARACTERÍSTICA DEL MOLDE

Código LWD-001

Modelo TERRATEST LWD GmbH

Marca TERRATEST 9000 LWD

2. CÓDIGO / CERT. CALIBRACIÓN DE EQUIPOS AUXILIARES USADOS PARA LA VERIFICACIÓN

CÓDIGO	CERTF. CALIBRACIÓN
–	----

3. CONDICIONES AMBIENTALES

	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	22	22.5
Humedad Relativa %	31	31

4. MEDIDAS

RANGO (0.1 mm+/- 0.01 mm)						
	MEDIDA A	MEDIDA B	MEDIDA C	PROMEDIO	0922 G01	0922 G02
1	0.097	0.116	0.098	0.104	0.101	0.103
2	0.098	0.116	0.098	0.104	0.101	0.104
3	0.098	0.115	0.098	0.104	0.101	0.104
4	0.096	0.113	0.098	0.102	0.101	0.101
5	0.097	0.114	0.098	0.103	0.101	0.102
6	0.096	0.114	0.096	0.102	0.101	0.104
7	0.096	0.112	0.097	0.102	0.101	0.102
8	0.095	0.114	0.094	0.101	0.101	0.102
9	0.095	0.111	0.097	0.101	0.101	0.104
10	0.095	0.114	0.097	0.102	0.101	0.104
MEDIA	0.096	0.114	0.097	0.1024	0.101	0.103
VALOR MAXIMO				0.104	0.101	0.104
VALOR MINIMO				0.101	0.101	0.101
DESVIACION ESTANDAR				1.1	0.0	1.2
DESVIACION MEDIA MAXIMA				1.5	0	1
DESVIACION MEDIA MINIMA				-1.5	0	-2
FACTOR DE CALIBRACIÓN					1.0149	0.9951

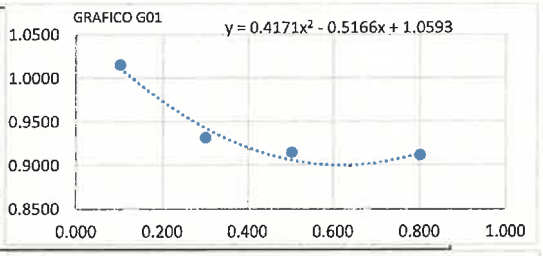
RANGO (0.3 mm+/- 0.01 mm)						
	MEDIDA A	MEDIDA B	MEDIDA C	PROMEDIO	0922 G01	0922 G02
1	0.289	0.313	0.288	0.297	0.318	0.327
2	0.292	0.308	0.287	0.296	0.319	0.329
3	0.289	0.311	0.291	0.297	0.319	0.328
4	0.291	0.311	0.286	0.296	0.318	0.328
5	0.289	0.311	0.285	0.295	0.318	0.328
6	0.292	0.309	0.284	0.295	0.318	0.327
7	0.289	0.311	0.288	0.296	0.318	0.328
8	0.286	0.315	0.290	0.297	0.318	0.328
9	0.292	0.313	0.286	0.297	0.318	0.327
10	0.288	0.314	0.289	0.297	0.318	0.328
MEDIA	0.290	0.312	0.287	0.2962	0.318	0.328
VALOR MAXIMO				0.297	0.319	0.329
VALOR MINIMO				0.295	0.318	0.327
DESVIACION ESTANDAR				0.8	0.4	0.6
DESVIACION MEDIA MAXIMA				0.7	0.8	1.2
DESVIACION MEDIA MINIMA				-1.3	-0.2	-0.8
FACTOR DE CALIBRACIÓN					0.931	0.9040

RANGO (0.5 mm+/- 0.01 mm)						
0.88	MEDIDA A	MEDIDA B	MEDIDA C	PROMEDIO	0922 G01	0922 G02
1	0.488	0.551	0.487	0.509	0.556	0.574
2	0.48	0.551	0.487	0.506	0.554	0.573
3	0.479	0.551	0.488	0.506	0.555	0.572
4	0.484	0.553	0.486	0.508	0.555	0.574
5	0.480	0.553	0.494	0.509	0.557	0.575
6	0.482	0.550	0.492	0.508	0.555	0.574
7	0.484	0.550	0.483	0.506	0.554	0.573
8	0.488	0.550	0.488	0.509	0.556	0.574
9	0.487	0.553	0.488	0.509	0.557	0.575
10	0.482	0.552	0.49	0.508	0.557	0.575
MEDIA	0.483	0.551	0.488	0.5077	0.556	0.574
VALOR MAXIMO				0.509	0.557	0.575
VALOR MINIMO				0.506	0.554	0.572
DESVIACION ESTANDAR				1.3	1.2	1.0
DESVIACION MEDIA MAXIMA				1.2	1.4	1.1
DESVIACION MEDIA MINIMA				-1.8	-1.6	-1.9
FACTOR DE CALIBRACIÓN					0.914	0.8848

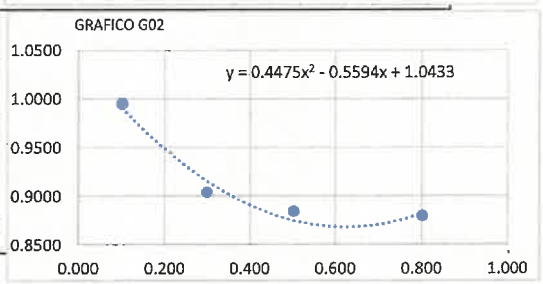
RANGO (0.8 mm+/- 0.01 mm)						
	MEDIDA A	MEDIDA B	MEDIDA C	PROMEDIO	0922 G01	0922 G02
1	0.761	0.847	0.784	0.797	0.876	0.907
2	0.764	0.85	0.776	0.797	0.876	0.906
3	0.768	0.851	0.782	0.800	0.878	0.907
4	0.765	0.85	0.783	0.799	0.877	0.909
5	0.765	0.853	0.782	0.800	0.878	0.908
6	0.767	0.852	0.777	0.799	0.876	0.906
7	0.763	0.852	0.783	0.799	0.877	0.908
8	0.762	0.852	0.780	0.798	0.877	0.908
9	0.767	0.844	0.786	0.799	0.876	0.906
10	0.762	0.851	0.786	0.800	0.877	0.908
MEDIA	0.764	0.850	0.782	0.7988	0.8768	0.907
VALOR MAXIMO				0.800	0.878	0.909
VALOR MINIMO				0.797	0.876	0.906
DESVIACION ESTANDAR				1.2	0.8	1.1
DESVIACION MEDIA MAXIMA				1.2	1.2	1.7
DESVIACION MEDIA MINIMA				-1.8	-0.8	-1.3
FACTOR DE CALIBRACIÓN					0.911	0.88

INGEOTECON GEOTECNIA, CONCRETO Y PAVIMENTOS	LABORATORIO FORMATO **VERIFICACION DE EQUIPO LWD**	Código F-LAB-194 Versión 01 Fecha 2023-06-10 Página 2 de 2

G01			
Factor de calibración	Deflección	Factor de correción	
1.0149	0.101	1.011	0.102
0.9310	0.318	0.9426	0.3
0.914	0.5556	0.9046	0.503
0.911	0.8768	0.9134	0.801



G02			
Factor de calibración	Deflección	Factor de correción	
0.9951	0.103	0.990	0.102
0.904	0.328	0.9163	0.3
0.885	0.5739	0.8744	0.502
0.880	0.9073	0.883	0.801



PRECISION									
REFERENCIA				0922 G01			0922 G02		
rango	promedio	precision		promedio	precison		promedio	precision	
0.1	0.1025	1.5	-1.5	0.101	0	0	0.103	1	-2
0.3	0.296	0.7	-1.3	0.318	0.8	-0.2	0.328	1.2	-0.8
0.5	0.508	1.2	-1.8	0.556	1.4	-1.6	0.574	1.1	-1.9
0.8	0.799	1.2	-1.8	0.877	1.2	-0.8	0.907	1.7	-1.3

BIAS							
REFERENCIA		DEFLECTOMETRO G01 CALIBRADO µ	BIAS %		DEFLECTOMETRO G02 CALIBRADO µ	BIAS %	
0.1025		0.102	0.5		0.102	0.5	0.5
0.296		0.3	-3.7		0.3	-3.7	-1.2
0.508		0.503	4.8		0.502	508	1.1
0.799		0.801	-2.2		0.801	-2.2	-0.3
							OK

INGEOTECON E.I.R.L.
PORTAL ESPINO FRED FERNANDO
INGENIERO CIVIL
CIP: 242655

REALIZADO POR

INGEOTECON E.I.R.L.
LUCERO LEON QUISPE
RESPONSABLE DE CALIDAD
CIP N° 348721

REVISADO POR

UNSCH FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS Nº 77-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 437-2026-FIMGC-D**, a los **trece días del mes de octubre de 2026**, siendo las **10:13 a.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ**, y los miembros: **Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI**, **Ing. Ángel Hugo VÍLCHEZ PEÑA** y **Ing. Hemerson LIZARBE ALARCÓN**, actuando como secretario docente el **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil:

JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS

Quien presentó la tesis denominada:

Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 16 (dieciséis)

Siendo las **12:06 p.m.** del día **13 de octubre del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. Edmundo CANCHARI GUTIÉRREZ
Presidente

Ing. Ángel Hugo VÍLCHEZ PEÑA
Miembro

Ing. Hemerson LIZARBE ALARCÓN
Miembro

Ing. Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANI
Miembro - Asesor

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNÁNDEZ
Secretario

FACULTAD DE INGENIERÍA
DE MINAS Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N.° 01-2026-FIMGC/MGTP

La suscrita, en calidad de Docente Instructor de Verificación de la Originalidad de Trabajos de Investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en cumplimiento del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad, aprobado mediante Resolución de Consejo Universitario N.° 039-2021-UNSCH-CU, y de la Resolución Decanal n.° 507-2026-FIMGC-D, dejo constancia de que se ha efectuado la verificación de originalidad del trabajo de investigación correspondiente a:

Apellidos y nombres	:	Espinoza Barrientos, Jhon Kenyi
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Título del trabajo de investigación	:	Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025.
Índice de similitud obtenido	:	13 %
Identificador de entrega	:	3087237918
Fecha de evaluación	:	11 de noviembre de 2026

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, resulta **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines académicos y administrativos correspondientes.

Se expide la presente constancia en señal de conformidad y para los fines pertinentes.

Ayacucho, 11 de noviembre de 2026.

.....

Mg. Ing. Main G. Tenorio Palomino

Con depósito para trámites
Cc. Archivo.

FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL
Av. Independencia S/N Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151

Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025

por JHON KENYI ESPINOZA BARRIENTOS

Fecha de entrega: 11-nov-2026 07:24p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 3087237918
Nombre del archivo: Borrador_de_Tesis_JHON_KENYI_ESPINOZA_BARRIENTOS.pdf (24.98M)
Total de palabras: 2669
Total de caracteres: 212956

Evaluación numérica de las deformaciones por solicitaciones de cargas vehiculares aplicado en rellenos estructurales, Ayacucho 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	12%	1%	10%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	pt.slideshare.net Fuente de Internet	4%
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	4%
3	www.geomod.ch Fuente de Internet	3%
4	Submitted to Imperial College of Science, Technology and Medicine Trabajo del estudiante	1%
5	archive.org Fuente de Internet	1%

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 30 words
Excluir bibliografía	Activo		