

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



**T E S I S**

**Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de  
la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021**

**Para optar el título profesional de:**

**Ingeniero Civil**

**Autor: Bach. Walter Omar BERNAL AYALA**

**Asesor: Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL**

**Cerro de Pasco - Perú – 2022**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



**T E S I S**

**Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la  
subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021**

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

---

**Mg. José Germán RAMIREZ MEDRANO  
PRESIDENTE**

---

**Dr. Hildebrando Anival CONDOR GARCÍA  
MIEMBRO**

---

**Mg. Pedro YARASCA CORDOVA  
MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

A mi esposa Noemí, a mis hijos Lissel y Dylan, y a mis padres Juan e Isabel quienes constantemente se encuentran a mi lado apoyándome en todo momento para lograr mis objetivos y superarme en el aspecto personal, familiar y profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, agradecer y reconocer a nuestra alma mater la **Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión**, que me brinda la oportunidad de poder presentar y sustentar mi tesis para poder optar el título profesional de Ingeniero Civil.

También expreso mi sincero agradecimiento y a mi **Asesor de Tesis, Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL**, y los **distinguidos miembros de jurado calificador, al Mg. José Germán RAMIREZ MEDRANO, Dr. Hildebrando Anival CONDOR GARCÍA y Mg. Pedro YARASCA CORDOVA** por haberme orientado, compartido sus conocimientos y experiencias y haberme apoyado para hacer posible la elaboración de esta presente tesis.



## RESUMEN

La presente tesis Sistema Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco 2021, describe, evalúa, compara y comprueba los resultados del comportamiento estructural de la subrasante partiendo de los datos de laboratorio de la muestra realizada en campo y del proceso de análisis por Métodos Numéricos aplicando el Método de Elementos Finitos. Esta investigación se enfoca en el comportamiento estructural de la subrasante que viene a ser la base de cimentación de una infraestructura vial del pavimento flexible y vía departamental clasificado como Carretera de Segunda Clase (DG-2018:MTC, pág. 12) donde recibe en última instancia la transferencia de cargas dinámicas que se ejerce por el tránsito vehicular, por lo cual se realiza el análisis del estado elastoplástico y caracterización del suelo de fundación con el fin de determinar las características físicas y mecánicas de la subrasante, y comparar los datos evaluando su comportamiento mediante el Método de Elementos Finitos que es un método numérico donde resuelve problemas de aproximación continua mediante ecuaciones diferenciales parciales, mediante los ensayos realizados de la muestra de suelo se comparará la información con el simulación en el software PLAXIS-2D, donde se establecen mallas y nodos fragmentándolo en áreas geométricas de los elementos del suelo en estudio y realizar el análisis en cada una de sus partes las cargas y esfuerzos recibidos y se verifica el resultado de los desplazamientos calculados, todo ello nos permite evaluar y determinar la resistencia y el límite de elasticidad de la subrasante definiendo parámetros que no pierdan su propiedades físico-mecánicas.

**Palabras claves:** Carga, Esfuerzo-Deformación, Desplazamiento, Mohr-Coulomb, Método de Elementos Finitos.

## **ABSTRACT**

This thesis Finite Element Method System and its application in the evaluation of the subgrade of the Yanahuanca - Cerro de Pasco Highway 2021, describes, evaluates, compares and verifies the results of the structural behavior of the subgrade based on laboratory data from the sample carried out in the field and the analysis process by Numerical Methods applying the Finite Element Method. This research focuses on the structural behavior of the subgrade that becomes the foundation base of a flexible pavement road infrastructure and departmental road classified as Second Class Highway (DG-2018: MTC, page 12) where it ultimately receives instance the transfer of dynamic loads exerted by vehicular traffic, for which the analysis of the elastoplastic state and characterization of the foundation soil is carried out in order to determine the physical and mechanical characteristics of the subgrade, and compare the data evaluating its behavior through the Finite Element Method, which is a numerical method where it solves continuous approximation problems through partial differential equations, through the tests carried out on the soil sample, the information will be compared with the simulation in the PLAXIS-2D software, where meshes are established and nodes fragmenting it into geometric areas of the soil elements under study and carry out the analysis in each of its parts the loads and stresses received and the result of the calculated displacements is verified, all this allows us to evaluate and determine the resistance and the elasticity limit of the subgrade defining parameters that do not lose their physical properties. mechanical.

**Keywords:** Load, Stress-Strain, Displacement, Mohr-Coulomb, Finite Element Method.

## INTRODUCCIÓN

### **Señores del miembro del jurado:**

En cumplimiento con las disposiciones establecidas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión; sometemos a vuestro criterio el presente informe de investigación intitulado: **“Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco 2021”**, con el fin de obtener el título profesional de Ingeniero Civil.

El trabajo conlleva a identificar zonas críticas del estado de conservación del pavimento flexible de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco dentro del tramo 1 y 2 evaluando su tiempo de vida útil y poder determinar antes, durante y después el uso de la infraestructura vial en términos de indicadores de las propiedades geotécnicas enfocándonos en la primera capa de subrasante de la vía, todo esto conlleva dentro del trabajo en campo donde se evidenció en el tramo 1 y 2 zonas fisuradas, agrietadas comprometiendo la capa de la base granular y la falta de ejecución de la señalización y dispositivos de control de seguridad vial, con respecto al estado del pavimento se tomó el criterio de identificar los puntos críticos para ejecutar las calicatas en el tramo 1 y 2, considerando el registro de 8 puntos de coordenadas UTM, evaluando en función al estado de conservación de la vía en cada progresiva y la accesibilidad en el aspecto técnico, social y administrativo mediante el permiso de la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones Pasco. Según la evaluación técnica se definió 4 calicatas accesibles pero se tomó en cuenta para la investigación dos calicatas críticas tomando una en el tramo 1 y 2 respectivamente, considerando el tipo de suelo, el estado crítico de la conservación de la vía en la progresiva que se tomó la muestra y la presencia de

contenido de humedad en dicha zona, siguiendo las normas técnicas se realizó el ensayo en laboratorio para el estudio de mecánica de suelos y luego obtener los datos de las características físicas y mecánicas de las dos muestras de la subrasante tomado a 1.5 metros de profundidad desde 0.50 centímetros bajo el nivel de la superficie de la carpeta asfáltica descontando el espesor del paquete estructural del pavimento flexible existente.

Esta investigación valora el uso de las herramientas tecnológicas y el uso de métodos numéricos que nos ayuda a simular el comportamiento de cualquier estructura utilizando el método de elementos finitos mediante el uso de ecuaciones diferenciales parciales donde se realiza la discretización de elementos y cada elemento es analizado con relaciona los demás elementos dado una forma geométrica un nodo se genera una malla de elementos evaluando el comportamiento geotécnico de la subrasante donde se representa mediante el modelo constitutivo de Mohr-Coulumb que matemáticamente definirá el modelo matemático de representarse a la realidad sometido por las cargas dinámicas ejercidas de los vehículos y demás factores en la carretera Yanahuanca-Cerro de Pasco, con los ensayos en laboratorio, los parámetros de las características físicas y mecánicas serán el input de datos para poder simular mediante el Plaxis 2D y evaluar el esfuerzo-deformación generados por las cargas y analizar los desplazamientos como resultante y se podrá predecir el comportamiento real de la vía en la subrasante en una fase de tiempo gracias a los resultados obtenidos con el software.

Esta investigación se ha dividido en tres partes:

- En el capítulo uno describimos el planteamiento del problema y la definición de objetivos, se sustenta y se plantea el origen de la necesidad de la investigación definiendo en problemas específicos relacionados a los objetivos específicos que

pretende dar solución al problema en estudio, así como las limitaciones y la justificación de la investigación.

- En el capítulo dos se recopila la información de antecedentes de investigación y el marco teórico que es consecuente a la explicación del trabajo en campo, los ensayos realizados en laboratorio y la simulación realizada para analizar los datos y los resultados de solución al problema, así también los términos de referencia usados, se definen nuestra hipótesis general y específicas para que posteriormente lo demostremos y lo validemos, la operacionalización de variables para definir las dimensiones, sub dimensiones e indicadores por cada variable dependiente e independiente.
  
- En la tercera parte se detalla la metodología de investigación aplicado definiendo nuestro tiempo, nivel y diseño de investigación, así también el enfoque empleado según la estructura del trabajo de investigación propuesto, dentro del análisis y discusión de resultados mostramos evidencias del trabajo realizado y expresado en tablas, imágenes estadísticas e interpretación de datos donde se justifica la información demostrada y validada en el proceso de la investigación.

**El Autor.**

## INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

### CAPÍTULO I

#### PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema .....	1
1.2.	Delimitación de la investigación.....	3
1.3.	Formulación del problema.....	4
1.3.1.	Problema General.....	4
	¿En qué medida la aplicación de métodos de elementos finitos ayudará a evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021?.....	4
1.3.2.	Problemas Específicos.....	4
1.4.	Formulación de objetivos.....	4
1.4.1.	Objetivo General.....	4
	Aplicar el método de elementos finitos para evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.....	4
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	4
1.5.	Justificación de la investigación .....	5
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	6

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio.....	8
------	------------------------------	---

2.2.	Bases Teóricas - científicas.....	14
2.3.	Definición de Términos. ....	30
2.4.	Formulación de Hipótesis .....	33
2.4.1.	Hipótesis General. ....	33
2.4.2.	Hipótesis Específicas.....	33
	Hipótesis Especifica 1: .....	33
2.5.	Identificación de variables .....	34
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores. ....	38

### **CAPÍTULO III**

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

3.1.	Tipo de Investigación.....	43
3.2.	Nivel de la Investigación: .....	43
3.3.	Métodos de investigación. ....	43
3.4.	Diseño de investigación. ....	44
3.5.	Población y muestra.....	45
3.6.	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos. ....	45
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación. ..	46
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	47
3.9.	Tratamiento estadístico .....	47
3.10.	Orientación ética filosófica y epistémica. ....	48

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1.	Descripción del trabajo de campo.....	49
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados. ....	92
4.3.	Prueba de Hipótesis .....	162
4.4.	Discusión de resultados .....	177

#### **CONCLUSIONES**

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS



## **CAPÍTULO I**

### **PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

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

La importancia de esta investigación se basa en la ejecución del proyecto de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco que inició en el año 2006 y hasta la fecha no se ha culminado dicha obra, registrado en el Formato 12-B del Invierte.pe (MEF, 2022) como última valorización en diciembre del año 2021, acumulando un avance financiero de 194.5 millones que representa el 94.9%, con un costo actualizado de obra de 201.3 millones de soles, según esto indica un avance físico acumulado de 94.8% que corresponde a los tres tramos de esta obra, para el año 2022 asignaron un presupuesto de 6.4 millones de soles que programaron ejecutar 6.1 millones de soles, pero la obra se encuentra paralizada, en el transcurso de la ejecución del proyecto se ejecutó por administración directa e indirecta, se resolvieron los contratos asumiendo inspectores hasta el contrato de la supervisión sin poder culminar y cerrar este proyecto por más de 15 años.

En la actualidad dentro del sector transporte se ha priorizado dinamizar la economía en inversiones para la construcción, mejoramiento de carreteras así

también para el mantenimiento periódico y rutinario el cual significa un promedio del 3,19% entre marzo 2019 – marzo 2020 (INEI, Diario gestión, Ministerio de Economía y finanzas) mensual en el aporte del PBI como sector, según el INEI en vías departamentales se tienen más de 28,000 km donde el 80% no se encuentra pavimentada, en la región Pasco son 700 km de vías departamentales donde solo el 5% están pavimentadas y que existe una alta inversión en mantenimiento más de 100 millones por año y que en corto plazo se interviene por el mal diseño de la infraestructura vial por diversos factores.

En base a ello se parte de la identificación de las zonas críticas de la vía dentro del tramo 1 y 2 de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco con respecto al nivel de conservación de la vía y ejecutar la exploración en campo para obtener la muestras de suelo de la subrasante y llevarlos al laboratorio para los ensayos respectivos, esto permitirá el uso de la información de las características físicas y mecánicas de la subrasante para modelar y determinar el comportamiento estructural de la vía a nivel de la subrasante, el esfuerzo-deformación de la subrasante de forma detalla se realiza mediante modelos que permitan revisar y proponer una solución para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, aplicar el método de elementos finitos y analizarlos con los modelos constitutivos que rigen, pero podemos representar dentro de este modelo y acercarnos a valores exactos aplicando el algoritmo de Newton Raphson para determinar los esfuerzos que ejercen con las cargas dinámicas que se ejerce en la subrasante y comparar con los ensayos de laboratorio. En esta investigación se detalla los indicadores que permitirán evaluar, controlar y mejorar el comportamiento del suelo en la progresiva en estudio, con el finde identificar las deformaciones críticas en estado elástico – plástico.

Desde hace algunos años se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos (MEF) (Cook, et al., 1989) (Zienkiewicz, 1994) (Oñate, 1995), para estudiar el comportamiento de sólidos, formados con diferentes materiales, con formas complejas y sujetos a diferentes solicitaciones externas. Este método puede ser aplicado a gran número de problemas de ingeniería (Oñate y Botello, 1995), reduciendo cada vez más la incertidumbre del comportamiento de diferentes formas y distribuciones de materiales. Con ello se puede analizar cada indicador y poder cuantificarlo en cada etapa de su estado de la subrasante y comprender su comportamiento según las cargas ejercidas. Ponemos en claro que se realizara los ensayos correspondientes para comparar con la simulación realizada.

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

Esta investigación se enfoca al uso de un modelo numérico que nos ayuda ver el comportamiento en un software con las cargas dinámicas que se somete la vía exclusivamente a la subrasante. Esto no estima de forma exacta los valores de esfuerzo-deformación en el tiempo en función al tipo de suelo y los factores externos sin contrastar con los datos de los ensayos a realizar, donde al comparar con las muestras de suelo y los ensayos de laboratorio se tendrán valores exactos y comparativamente tendrán un bajo margen de error. Por lo cual existe viabilidad en la investigación porque nos permite inspeccionar el estado elastoplástico de la subrasante, evaluar y llegar a conclusiones que ayuden a mejorar la caracterización de los materiales de la subrasante en función al diseño de la infraestructura vial según el tráfico de vehículos y factores medioambientales.

### **1.3. Formulación del problema.**

#### **1.3.1. Problema General.**

¿En qué medida la aplicación de métodos de elementos finitos ayudará a evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021?

#### **1.3.2. Problemas Específicos.**

1. ¿La determinación de la característica geotécnica mediante ensayos en campo y en laboratorio permitirá evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco, 2021?
2. ¿La representación del comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco, 2021?
3. ¿Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco, 2021?

### **1.4. Formulación de objetivos.**

#### **1.4.1. Objetivo General.**

Aplicar el método de elementos finitos para evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos.**

1. Determinar la característica geotécnica mediante ensayos en campo y en laboratorio para evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

2. Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos para evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
3. Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos para evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

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

El siguiente trabajo de investigación se justifica por los criterios:

- **Justificación teórica.**

Se busca estimar con el menor margen de error el comportamiento de diferentes formas y distribuciones que se pueda evaluar las variables más significativas de la subrasante y de los fenómenos que se quieren estudiar, así como cuantificar la interacción de los diferentes mecanismos existentes. Lo anterior permite reducir el número de ensayos de laboratorio; lo que evidentemente conduce a proyectos más baratos y eficientes, que se obtienen en un tiempo de estudio mucho más corto.

- **Justificación social.**

Se busca analizar y comprender a detalle los esfuerzos que ejercen en la subrasante de la vía ya que mediante métodos numéricos nos permita acercarnos el modelo propuesto comparar con la realidad el comportamiento del suelo y poder tomar decisiones en el proceso del estudio del proyecto para la construcción de una infraestructura vial con un nivel de serviciabilidad deseable de acuerdo a la demanda y tipo de vía según lo clasifica el MTC.

- **Justificación práctica.**

Por otro lado, es posible obtener soluciones aproximadas en términos de esfuerzo-deformación mediante métodos numéricos, los cuales ofrecen una solución en algunos puntos del dominio, teniendo como requisito la discretización del cuerpo objeto de análisis. La presente investigación nos ayudará a entender cómo se relacionan nuestras variables de estudio, control interno, de manera que podamos comprender la influencia que ejerce una sobre otra. Los resultados obtenidos podrán servir para ser utilizados como base al momento de tomar decisiones.

- **Importancia o propósito.**

Se espera que en la presente investigación se pretenda analizar la tensión deformación de la subrasante se suele abordar a partir de modelos discretos, en algunas ocasiones mediante métodos numéricos tales como los elementos finitos. Sin embargo, sigue siendo bastante común representarlo a partir del modelo constitutivo Mohr-Coulomb, ya que ofrece una mayor simplicidad para efectos de cálculo y es posible modelar simultáneamente el suelo y la estructura de cimentación. En este documento se describen los métodos más comunes empleados para el esfuerzo-deformación y los desplazamientos en la simulación con el PLAXIS-2D y comparar los resultados con los ensayos de laboratorio.

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

La investigación se verá limitado por el factor del complicado trámite administrativo para otorgar el permiso en realizar las calicatas en la carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco por parte de la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones Pasco como unidad ejecutora que pertenece al Gobierno

Regional de Pasco como pliego, y es administrado por esta entidad por ser una vía departamental y encontrarse dentro de su jurisdicción, pues se debe tener la aprobación del permiso respectivo para poder obtener el estudio de mecánica de suelos.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

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

##### **A) A nivel Internacional.**

A nivel internacional hay estudios presentados el cual definen como una de sus variables al módulo de resiliencia y su análisis aplicando diferentes metodologías para diseñar de manera óptima un pavimento flexible.

- Se hace referencia a la tesis de Universidad Politécnica de Cataluña de doctorado titulado: “**Estudio Experimental y Análisis Numérico de la Deseccación en Suelos Arcillosos**” (Catalán Pere Prat, 2015, pág. 8), esta investigación refiere al estudio del análisis mediante el método numérico en el proceso de desecación del suelo arcilloso poco plásticos con variación de volumen y que genera grietas con el cambio de temperatura y con aplicación de cargas, donde se evalúa en todo el proceso los indicadores y dimensiones que se encuentran involucrados. Analizando los modelos constitutivos y dentro de ello las simulaciones



bibliografías y comprender en cada fase la desecación y agrietamiento que sucede en el comportamiento del suelo. Esta investigación refiere a la auscultación para identificar grietas en el subsuelo que se evidencia con una técnica mediante el georadar para la auscultación conociendo los beneficios en el procedimiento del trabajo técnico. Mediante las muestras realizadas se realiza la investigación de la comparación de lados y de la variación de volumen del suelo en todo el procedimiento. Dentro de los ensayos en laboratorio se realizó el secado rápido y en su estado húmedo, luego en la saturación de la muestra y analizara sus propiedades físicas, dentro de las bibliografías esta investigación dentro de la Mecánica de Suelos y los modelos constitutivos de comportamiento del suelo fisco-mecánico y en la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) donde se explica y se comprende en cada estado del suelo los cambios cuando interactúa con el flujo del agua en los poros del suelo plástico y como se agrieta al cambio de temperatura. Se simula usando el programa MATLAB aplicando el Método de los Elementos Finitos (MEF) con el fin de analizar paso a paso dentro de la hidrología y mecánica del suelo deformable de flujo definiendo los nodos y áreas de estudio y obteniendo datos de variación de volumen del suelo arcilloso.

- En Cali en la Universidad Católica Andrés Bello Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil se presentó la siguiente tesis: **“Modelaje Geotécnico por Elementos Finitos y Comprobación Instrumental de la Exactitud Lograda”** (Herman, 2015). En la resolución de problemas complejos relacionados con la ingeniería geotécnica se

requiere integrar ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, para lo cual es indispensable recurrir al empleo de los métodos numéricos; entre los cuales el de los Elementos Finitos es el más utilizado. Varios especialistas aplican el uso de software para evaluar y llegar a conclusiones en el uso del método de elementos finitos donde los indicadores a medir según el estudio involucran parámetros de entrada y salida para su análisis y el uso de algoritmos de aproximaciones exactas permiten que las simulaciones tengan bajos márgenes de error y que es posible evaluar el comportamiento del suelo para la toma de decisiones en implementar estructuras a largo plazo, en esta investigación hace uso del software SAGE CRISP para resolver problemas de la geotecnia. Existen otros programas que ayudan a poder evaluar el comportamiento en cada estado del suelo, pero se avocará con esta herramienta ya que en base a los nodos formados por el modelo y las ecuaciones mediante derivadas parciales y el modelo constitutivo adoptado permitirá evaluar y sacar conclusiones de como interactúa el suelo con las cargas ejercidas.

**B) A nivel Nacional.**

Dentro de los estudios en el entorno nacional se detalla:

- En la Universidad Nacional de Huancavelica se presentó la tesis: **“Análisis Dinámico de Estabilidad de Taludes por Elementos Finitos en la Zona de Huayllapampa del Distrito de Cuenca – Huancavelica”** (TARDEO DE LA CRUZ Cesar Augusto, 2016, págs. 25-26). Esta investigación indica el estudio de la estabilidad de talud donde evalúa el factor de seguridad con el método de elementos finitos

en Huayllapampa del distrito de Cuenca, región Huancavelica, año 2016, dentro del estudio evalúa el riesgo de deslizamiento usando el método Mora Vahrson, evaluando factores del talud el ángulo de su pendiente, el tipo de suelo, el comportamiento a cargas, factores ambientales, y desplazamientos horizontales. Usando el método determinístico la tesis se basa en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes aplicando el modelo numérico realizando el análisis dinámico y estático y teniendo en cuenta que el FS es de 1.25, por lo cual es inestable, y se evalúa para poder determinar el indicador que permita un talud estable con todos los factores y concluye las recomendaciones de implementar estructuras de acuerdo al tipo de suelo en estudio.

- En la Pontificia Universidad Católica del Perú en Lima se presenta la tesis de Pregrado: “**Análisis Dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los Taludes de la Costa Verde en el Distrito de Miraflores**”. (Varese, 2018, pág. 18). La investigación refiere a la evaluación de taludes de la Costa Verde, en el distrito de Miraflores. Aplicando el método equilibrio limite que indica no permite realizar un análisis real a la distribución de esfuerzos en la estructura , por lo cual incluye analizarlos con un modelo dinámico para incluir otros factores como el medio ambiente, desplazamientos horizontales y cargas dinámicas existentes, por ende cómo se comporta un suelo proyectándose a encontrar el fenómeno de licuefacción e suelos, este estudio hace el uso del software GeoStudio 2004 v6.20 para modelar un talud de forma geodinámica y determinar los factores de seguridad

aproximados a la realidad, dentro de ello incluyo en su análisis en QUAKE/W, el análisis sísmico dichos parámetros incluyo en su simulación en la aplicación SLOPE/W, los parámetros para poder identificar las fallas de talud y asignar un FS estable. Los valores del tiempo historia de sismos y valores para el análisis dinámico se refirió a la tesis fueron obtenidos de la tesis sobre “Estabilidad de Taludes en la Costa Verde, Distrito de Miraflores”, cuyo autor es Alonso Vargas, información recopilada desde el año 1966 al 1975 y 2006, el cual incluyo datos de los datos del CISMID. Concluyendo y recomendando como realizar la evaluación con el uso del software mediante el método de elementos finitos mediante un manual.

- En la Universidad Católica de Santa María en Arequipa se presentó la siguiente tesis titulada: **ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-SOSTENIMIENTO PARA TUNELES CIRCULARES MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS** (Andrea, 2019, pág. 12). En la actualidad el crecimiento urbanístico y poblacional inmoderado de las ciudades ha generado nuevos y urgentes retos a los planificadores. Surgiendo así la necesidad de incorporar la construcción de túneles en zonas urbanas. La excavación de un túnel genera una serie de movimientos en el terreno, ocasionando un desequilibrio tensional en el suelo, razón por el cual el diseño de túneles en suelos debe considerar, entre otros, las propiedades geotécnicas del terreno y la interacción suelo-sostenimiento, tomando en cuenta el comportamiento real del terreno. Volviéndose fundamental el estudio del comportamiento de este tipo de estructuras subterráneas. Por lo tanto, este trabajo pretende analizar

la interacción suelo-sostenimiento para túneles circulares mediante elementos finitos, bajo el efecto de diferentes parámetros tales como el sistema de sostenimiento, tipo de suelo, radio y profundidad del túnel excavado, siendo probable que los esfuerzos y deformaciones en el sistema de sostenimiento varíen. En el transcurso de este trabajo se tocó conceptos básicos de la construcción de túneles, sus métodos de diseños, el manejo del software PLAXIS 2D y su aplicación en túneles. En el presente trabajo que lleva el consisto en el análisis del comportamiento suelo – sostenimiento en la construcción de túneles circulares mediante elementos finitos con la utilización del software PLAXIS 2D, bajo el efecto de diferentes parámetros tales como el sistema de sostenimiento, tipo de suelo, radio y profundidad del túnel excavado. Se recopiló diferentes estudios de suelos, y finalmente se eligió basar la investigación en el estudio de suelos del Expediente Técnico Fase 1 Túnel Pucara –Transandino del Proyecto Majes- Siguaneta Etapa II, realizado por la Concesionaria Angostura Siguaneta, teniendo como 3 tipos de suelo las Andesitas, Brechas y Tobas. Además, suponiendo el método de construcción mediante TBM, se escogió como tipo de sostenimiento dovelas de 30 cm, 40 cm y 50 cm, donde el diseño geométrico fue extraído del proyecto majes. El diseño geométrico del túnel se basó en el Manual de Carreteras, Túneles, Muros y Obras Complementarias, considerando radios para un, dos y tres carriles. Finalmente, las profundidades escogidas fueron de 10 m, 20 m y 30 m. En total se modeló 81 diferentes escenarios túneles circulares con la ayuda del programa PLAXIS 2D.

## **2.2. Bases Teóricas - científicas.**

- **Métodos Numéricos:**

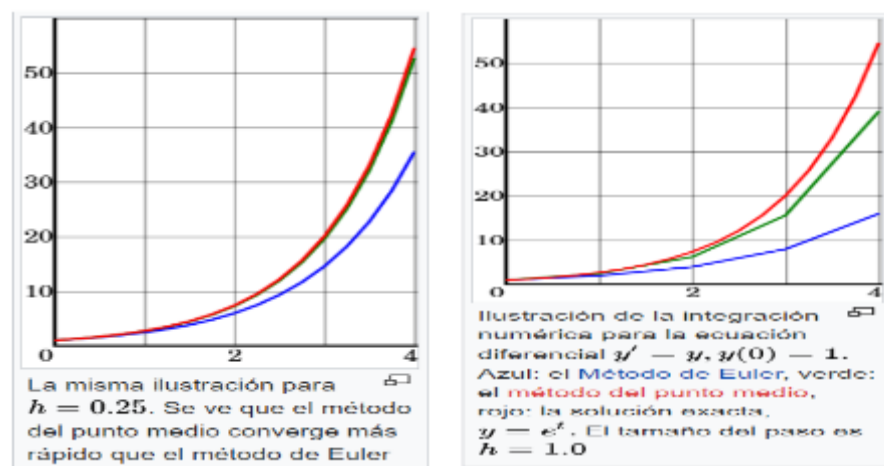
Dentro de los modelos matemáticos, los Métodos Numérico nos ayudan a realizar operaciones y procesos de simulación mediante la resolución de las derivadas parciales, que incluyen algoritmos que nos aproximan con un pequeño margen de error a la solución del problema relacionado a un modelo matemático que rige el comportamiento fisco-mecánico de la subrasante de la vía. Esto repercute que mediante el desarrollo del método numérico se aproximan a valores con un bajo índice de margen de error ya que dentro de la geotecnia los modelos constitutivos mediante fórmulas matemáticas se encuentran formuladas también de forma aproximada y que el comportamiento del suelo incluyendo todos los factores es variable, y mediante ello nos permitiría simular cómo se comporta dentro de la simulación mediante programas de computadora, ello conlleva elegir un eficiente procedimiento aplicando las fórmulas matemáticas de forma automatizada de forma eficiente. Dentro de los fenómenos que se suscitan el investigador debe incluir los parámetros reales dentro del objeto de estudio mediante las muestras y ensayos de laboratorio ya que estos valores nos ayudan a interpolar y extrapolar para acercarnos más a los valores reales en el comportamiento estructural de la subrasante. Generalmente cuando se relajan las suposiciones físicas llegamos a un modelo matemático más apropiado, pero, al mismo tiempo, más difícil o imposible de resolver explícitamente. (Virginia Muto Foresi, 2015).

Para poder resolver problemas que, hallando dichas aproximaciones mediante las ecuaciones diferenciales ordinarias, se aplica mediante el procedimiento de integraciones numéricas, y poder determinar los esfuerzos y deformaciones (Wellington, 2018). Para poder encontrar la solución mediante este modelo matemático requiere de trabajar mediante aproximaciones ya que por la complejidad de la información mediante parámetros de entrada y salida ("análisis") es necesario emplear algoritmos que puedan encontrar valores de forma infinitesimal y relacionar las cargas con las deformaciones causadas.

Aplicar ecuaciones diferenciales parciales repercute a todos los campos en la ciencia. Además, algunos métodos en ecuaciones diferenciales parciales numéricas convierten una ecuación diferencial parcial en una ecuación diferencial ordinaria, que luego debe resolverse. (Wellington, 2018).

### Figura 1

Curva de convergencia de los diferentes métodos de aproximación



Nota: Resolución mediante ecuaciones diferenciales no lineales mediante modelos matemáticos con algoritmos que convergen para encontrar una solución más exacta (Wellington, 2018).

- **Método de Elementos Finitos:**

Desde hace algunos años se ha utilizado el Método de los Elementos Finitos, para estudiar el comportamiento de sólidos, formados con diferentes materiales, con formas complejas y sujetos a diferentes solicitaciones externas. Este método puede ser aplicado a gran número de problemas de ingeniería (Oñate, 1995), reduciendo cada vez más la incertidumbre del comportamiento de diferentes formas y distribuciones de materiales. Siendo posible observar el comportamiento físico-mecánico de la subrasante, mediante el análisis de las variables podremos identificar con datos cuantificados y los parámetros de serviciabilidad y llegar a conclusiones de la investigación que nos ayudan a identificar problemas estructurales y recomendar posibles mejoras.

Como descripción definimos el equilibrio estático de un sólido puede expresarse por el Principio de los Trabajos Virtuales (PTV), (Malvern, 1969).

$$\int_V \delta \epsilon^T \sigma dV = \int_V \delta u^T b dV + \int_A \delta u^T t dA + \sum_i \delta a_i^T q_i$$

El primer miembro de esta ecuación representa el trabajo virtual interno del sólido, expresado como el producto de los esfuerzos y deformaciones que aparecen en el sólido por la aplicación de fuerzas externas.

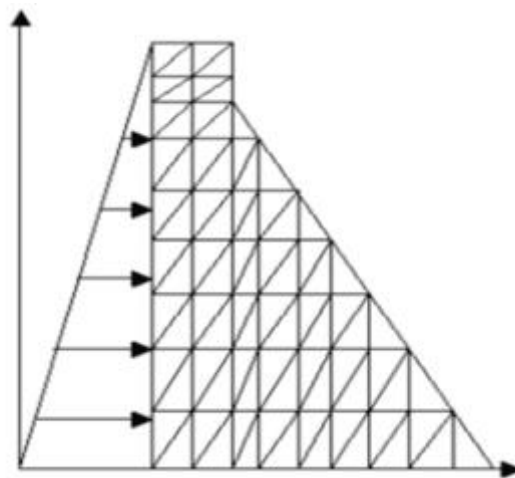
El segundo miembro la acción de fuerzas externas. Indica la formula las fuerzas de gravedad, fuerzas de presión de aire, agua, o de apoyo e interactúan en el suelo que refieren al esfuerzo ejercido en la subrasante y cargas puntuales de forma distribuida. Esta fórmula matemática mediante integrales evalúa el comportamiento del suelo con la interacción de cargas



de forma continua de forma complejas, dentro del modelo se discretiza por elementos finitos de formas geométricas o mallas para su análisis por cada elemento para poder realizar el análisis por cada elemento cuando ejercen las fuerzas, luego en los nodos asignados en la forma geométrica de cada elemento existen desplazamientos y reacciones que relacionan con los demás elementos denotándolo en la matriz de rigidez.

## Figura 2

*Discretización en elementos Finitos*



*Discretización en elementos finitos de una presa donde se ejerce cargas externas que modelan una presión hidrostática en elementos Finitos (Oñate, 1995).*

En la discretización con las mallas nodales del modelo continuo se realiza la interpolación mediante funciones de forma para de esa forma conocer los parámetros interiores de cada elemento mediante los nodos según el elemento triangular de la figura 2. El campo de desplazamientos del interior de la forma geométrica se expresa:

$$u = N_1u_1 + N_2u_2 + N_3u_3$$

$$v = N_1v_1 + N_2v_2 + N_3v_3$$

Donde:

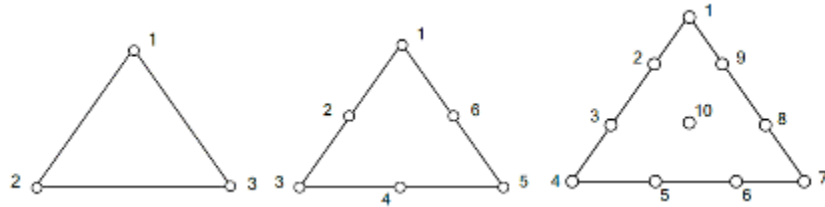
$N_i$ : función de forma del nodo  $i$

$u_i$  y  $v_i$ : valores de los desplazamientos en el nodo  $i$ .

Donde el valor de cada nodo es 1 y fuera 0 en los demás y la suma en el interior de la forma geométrica debe ser 1.

### Figura 3

*Nodos en una forma geométrica triangular*



*Nota: Elemento de forma triangular de modo bidimensional con 3, 6, 10 nodos donde ejercen esfuerzos en los vectores para determinar sus deformaciones nodales del elemento (Celigieta, 2011)*

En este caso se usarán las formas geométricas triangulares para el mejor análisis posible con el software y el trabajo con los nodos. Expresando el campo de desplazamientos en forma matricial, se tiene:

$$u = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}$$

que se puede escribir en forma reducida como:

$$u = Na^{(e)}$$

donde

$$N = [N_1, N_2, N_3], \quad u = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}$$

con

$$N_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{bmatrix}, \quad a^{(e)} = \begin{Bmatrix} a_1^{(e)} \\ a_2^{(e)} \\ a_3^{(e)} \end{Bmatrix}, \quad a_i^{(e)} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}$$

Para problemas bidimensionales (esfuerzo plano y deformación plana), el campo de deformaciones y el campo de esfuerzos (Gere, 2002) vienen dados por:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

En problemas de esfuerzo plano (ej. placas a tensión, vigas de gran canto) la deformación  $\varepsilon_z$  es diferente de 0, pero el esfuerzo normal  $\sigma_z$  sí lo es. En el conveniente de deformación plana el esfuerzo normal  $\sigma_z \ll 0$   $\varepsilon_z = 0$  y su producto resulta cero donde se discrimina en el cálculo de resistencia de materiales. Los vectores de esfuerzo y deformación se relacionan entre sí por medio de la ecuación (Gere, 2002).

En la matriz del modelo constitutivo y la ecuación mostrada, define las relaciones que existe la relaciones esfuerzo-deformación unitario del elemento en análisis. La matriz de deformaciones se define:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \mathbf{0} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \mathbf{0} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \mathbf{0} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \mathbf{0} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}$$

O bien en forma reducida

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{a}^{(e)}$$

Donde

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3] \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

$$\left[ \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \right] \mathbf{a}^{(e)} = \int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV + \int_A \mathbf{N}^T \mathbf{t} dA + \mathbf{q}^{(e)}$$

$$\mathbf{K}^{(e)} \mathbf{a}^{(e)} = \mathbf{f}^{(e)}$$

La matriz de rigidez  $K(e)$  es el elemento en análisis.

Donde:

$a(e)$  = vector de desplazamientos de nodos

$f(e)$  = vector de fuerzas de nodos equivalentes

Se está definiendo un elemento de forma triangular con tres nodos,

funciones de interpolación  $N_i$ :

$$N_i = \frac{1}{2A^{(e)}} (a_i + b_i x + c_i y) \quad , \quad i = 1, 2, 3$$

$$\text{con} \quad a_i = x_j y_k - x_k y_j \quad \quad b_i = y_j - y_k$$

$$c_i = x_k - x_j \quad \quad i, j, k = 1, 2, 3$$

El área triangular  $A(e)$  define el elemento de acuerdo a sus nodos numerados anti horariamente.

- **Solución de problemas no lineales en estructuras por incrementos de carga, Método Newton Raphson:**

En análisis numérico, el método de Newton (conocido también como el método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier) es un algoritmo para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. También puede ser usado para encontrar el máximo o mínimo de una función, encontrando los ceros de su primera derivada.

El método descrito, tal y como está, sólo puede aplicarse en problemas que involucran leyes constitutivas lineales y relaciones deformación-desplazamiento también lineales. Si estas relaciones no son lineales, como evidentemente ocurre en los suelos, entonces será necesario emplear técnicas numéricas especiales que permitan resolver dichos problemas. El

uso de técnicas iterativas permite reutilizar los métodos para problemas lineales en la solución de problemas no lineales. (Bathe, 1982) (Zienkiewicz  $\Psi_1 = K_i \delta u$ ), la solución del problema no lineal, se utilizaron los métodos de Newton-Raphson y de Newton-Raphson modificados (Dahlquist, 1974), dada su versatilidad y sencillez de programación. En la Figura 4 se ilustra el procedimiento de la solución del método de Newton-Raphson, aunque la implementación de los métodos de Newton modificados es totalmente análoga y conceptualmente no representa ninguna dificultad adicional. La figura es una gráfica de fuerzas contra desplazamientos de una estructura, la cual sigue una curva asociada a ecuaciones constitutivas (esfuerzo-deformación) no lineales de algunos (o todos) componentes de la estructura. Aunque la gráfica mostrada es unidimensional, es totalmente general si se visualizan sus componentes como vectores globales de la estructura y no como simples escalares. Partiendo de un punto sobre la curva para la cual se ha encontrado la solución de equilibrio entre fuerzas ( $f_n$ ) y desplazamientos ( $u_n$ ). Entonces, aplicando un incremento de fuerzas  $\Delta f$ , se debe llegar al punto  $n+1$  sobre la gráfica. Si  $i$  es el contador de iteraciones dentro del incremento  $\Delta f_{n+1}$ , la solución se obtiene aplicando sucesivamente un vector de fuerzas residuales  $\Psi_i$ , comenzando con  $\Psi_1 = \Delta f_{n+1}$ . En cada iteración, se obtiene un incremento de desplazamientos  $\delta u_i$ , que resulta de esta matriz se calcula de sumar matrices de rigidez conformados por relación de mallas:

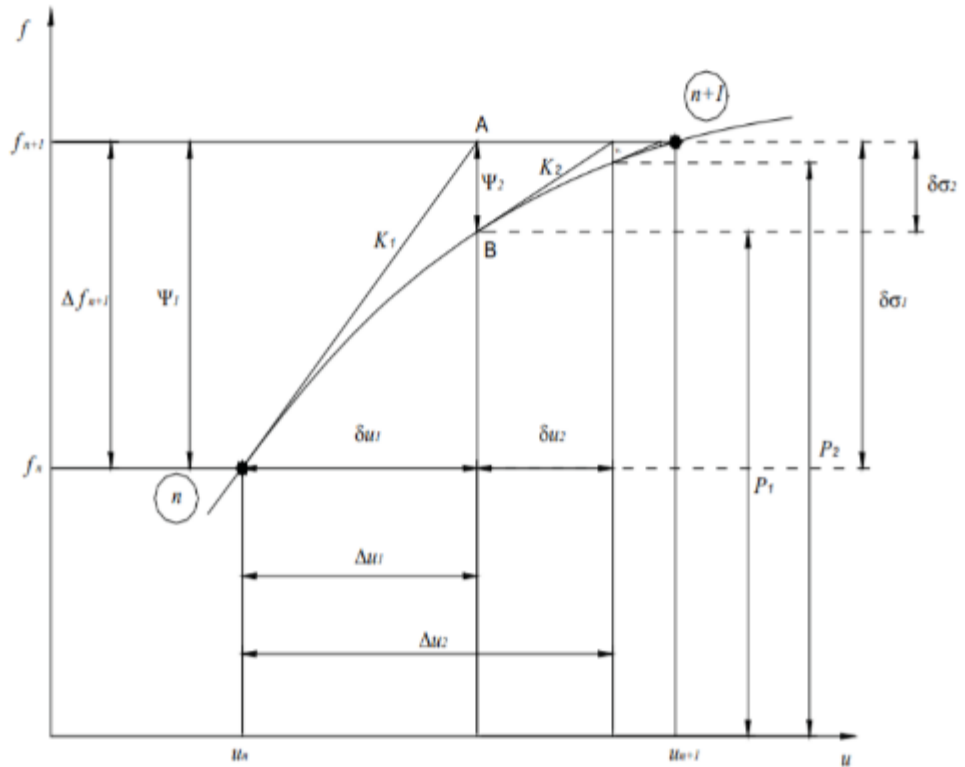
La matriz elástica tangente del cuerpo en análisis  $K_i$  se obtiene de la matriz de rigidez de forma individual y de la malla de elementos, obteniendo mediante la relación:

$$K^{(e)} = \int_V B^T D B dV$$

D indica la ecuación constitutiva como matriz define una función no lineal esfuerzo-deformación el cual incrementa en función al otro:

**Figura 4**  $\delta\sigma_i = DB\delta u_i^{(e)}$

*Método de Newton Raphson*



*Nota: Procedimiento de solución utilizando el método de Newton-Raphson (Kotronis & Collins, frederick, 2006).*

La Matriz D aumenta los esfuerzos y genera otra matriz de esfuerzos en el punto A no es correcto con el desplazamiento acumulado en un \$+\Delta u\_i\$ por lo cual en realidad está en el punto B. Los esfuerzos totales se afinan según la deformación de la muestra creando un vector:

$$\Psi_{i+1} = f_{n+1} - P_i$$

\$P\_i\$ el elemento muestra las fuerzas internas:

$$P_i = \int_V B^T \sigma_i^e dV$$

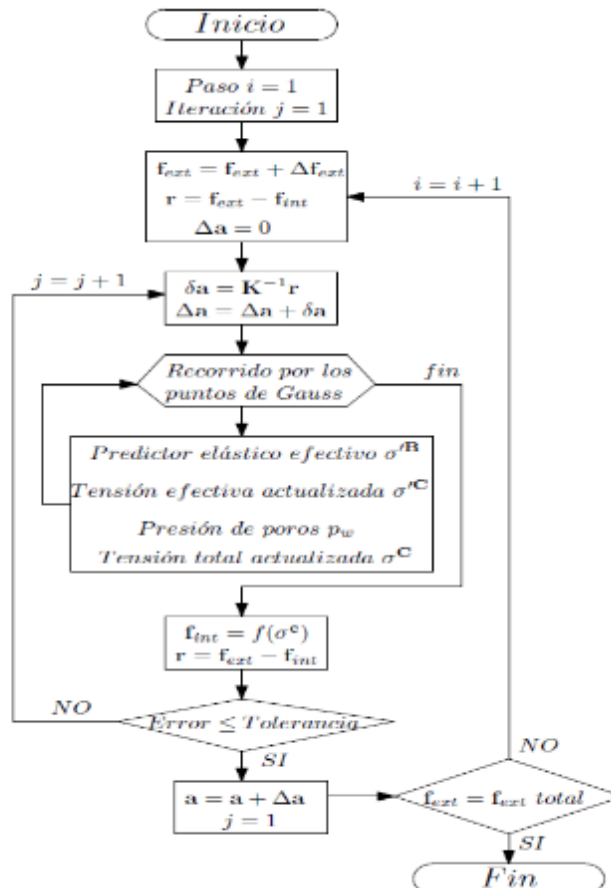
Se aplica una nueva matriz al elemento en el punto siguiente  $i+1$ . Se itera hasta conseguir un valor mínimo. Con el algoritmo de Newton Raphson cada ítem que aumente el esfuerzo y toma la matriz tangente desde el punto de partida el cual se define un margen de error mínimo  $e$ :

$$e = \frac{|\Psi_i|}{|\Delta f_{n+1}|}$$

El margen de error para minimizar debe limitarse las iteraciones para no caer un bucle infinito en una relación no lineal de curva esfuerzo-deformación.

**Figura 5**

*Algoritmo de Newton Raphson*



*Nota: Algoritmo de Newton-Raphson de rigidez inicial utilizado en el cálculo (Játiva, Constante, & Cabrera, 2014).*

- **Modelos constitutivos**

Wulfsohn y Adams (2002), refieren que para simular el comportamiento físico de un material es necesario tener modelos o relaciones entre esfuerzos y deformaciones que incorporen las propiedades del material en cuestión. Por otra parte, Desai (2005), considera que las leyes o modelos constitutivos representan una definición matemática para el comportamiento de un material basado en ensayos de laboratorio o de campo, que incluye factores significativos que afectan el comportamiento de este.

Los modelos constitutivos son expresiones matemáticas que expresan la relación esfuerzo-deformación de un material. Todos los aspectos que influyen en la respuesta mecánica del suelo bajo condiciones determinadas de carga no es posible tenerlas en cuenta, por lo tanto, se necesitan idealizaciones, tanto del material como de las condiciones de carga, para simplificar la expresión matemática. Estas idealizaciones incorporan las principales propiedades del material, excluyéndose los aspectos considerados de menor importancia (Wulfsohn y Adams, 2002).

El modelo constitutivo debe aplicarse solo para las condiciones en las cuales estos fueron desarrollados o validados. Por ejemplo; el modelo elástico clásico se aplica para materiales homogéneos, isotrópicos y elásticos lineales (Desai, 2005). Además, requieren una interpretación física a los modos en los cuales el material responde a los cambios en los esfuerzos aplicados o deformaciones. Por ejemplo, el suelo no debe ser modelado como elástico debido a que es posible que se produzcan



deformaciones permanentes después de retirada la carga (Prevost y Popescu, 1996).

Los modelos constitutivos se pueden dividir en dos grupos, empíricos y analíticos. Los modelos empíricos se desarrollan a partir de datos experimentales de un material bajo condiciones específicas de carga y luego estadísticamente, se determinan las ecuaciones que con mayor exactitud se ajustan a las observaciones. Los modelos analíticos aplican las leyes físicas para describir la respuesta esfuerzo-deformación del material. Estos modelos están basados en parámetros a escala microscópica o macroscópica.

Los modelos microscópicos consideran cada partícula en una masa sólida como una entidad distinta y luego predicen la respuesta esfuerzo-deformación basado en la distribución de fuerzas interpartículas. Los modelos macroscópicos tratan la masa sólida como un medio continuo o interacción continua y describen las características esfuerzo-deformación del material como un todo (Tripodi et al., 1992).

Los modelos constitutivos del suelo se pueden clasificar de acuerdo a criterios como (Shen y Kushwaha, 1988):

- Modelos lineales o no lineales; en dependencia de la linealidad de la ecuación y según sus estados elastoplásticos de acuerdo a la resistencia del material.
- Modelos reológicos en función al tiempo dentro de la simulación.

- **Ecuaciones constitutivas Mohr Coulomb**

Según se desprende de la literatura existente en el tema, las mejores pruebas de laboratorio disponibles para la determinación de los parámetros

mecánicos de los suelos son las pruebas de compresión de resistencia al esfuerzo cortante (Juárez y Rico, 1974).

Dentro de la mecánica de suelos se acepta que los suelos se comportan de acuerdo con la ley de resistencia de Mohr-Coulomb (Juárez y Rico, 1974).

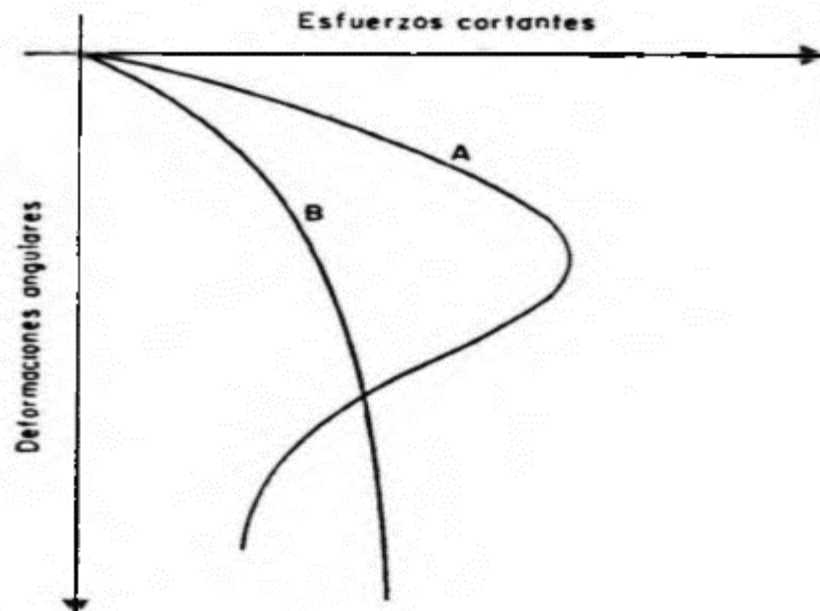
$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Esta ecuación es una ley constitutiva de material elastoplástico perfecto como la que se ilustra en la Figura 5. Sin embargo, la deformación en el punto de falla (y por lo tanto el esfuerzo máximo) no está definida, dado que el esfuerzo cortante de falla no tiene un valor constante, sino que depende del esfuerzo confinante  $\sigma$  que aparece en la ecuación de Mohr-Coulomb. De hecho, los parámetros  $c$  y  $\phi$  que intervienen en ella tampoco son constantes, pues dependen del contenido de humedad del suelo, de la velocidad de aplicación de la carga y de las condiciones de drenaje en que se encuentre el suelo (Juárez y Rico, 1974).

Todos estos parámetros son difíciles de considerar en una sola ecuación constitutiva, por lo que, con fines de simplificación, no se toman en cuenta en el cálculo los factores que producen las variaciones en los valores de  $c$  y  $\phi$ . En lugar de ello, se asume que esos factores deben ser considerados a priori, de modo que se debe analizar las condiciones en que se encontrará la estructura que se modela, y a partir de ahí elegir el tipo de prueba de laboratorio más adecuada para la obtención de los parámetros mecánicos. Por lo tanto, si se quieren modelar diferentes condiciones de humedad y de carga, será necesario realizar pruebas de laboratorio variando dichas condiciones y hacer un análisis numérico para cada una de ellas.

**Figura 6**

*Curvas Esfuerzos cortantes- deformaciones angulares*

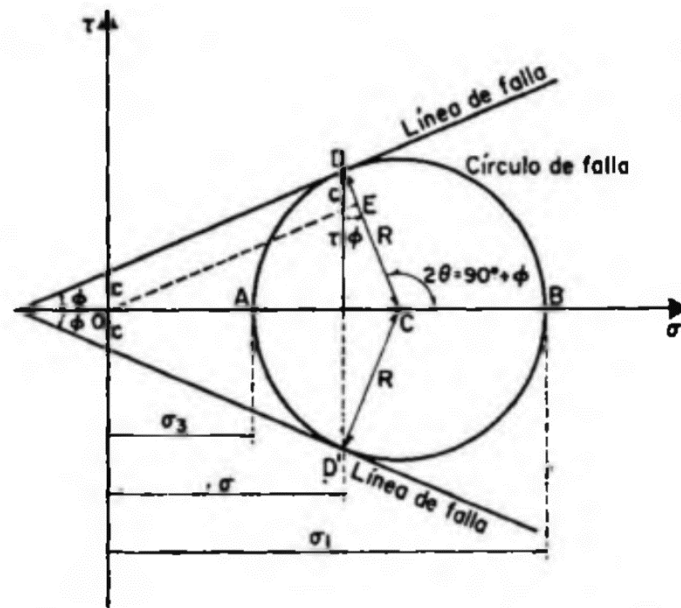


*Nota: Representación de falla en el punto máximo del esfuerzo cortante de A y B como el esfuerzo máximo donde inicia comportarse en su estado plástico (Juarez & Rico, 1973).*

En todo lo anterior, se ha supuesto que los esfuerzos actuantes en la masa de suelo son de compresión. La resistencia de los suelos a esfuerzos de tensión es muy pequeña, tanto que se considera nula. Se puede seguir dicha convención, o bien especificar un valor máximo (de esfuerzo o de deformación) a tensión que dicho suelo puede resistir. Debe resaltarse que los valores de los esfuerzos que aparecen en la ley de Mohr Coulomb (y en general de cualquier ley constitutiva) no dependen de la orientación de los ejes que se haya elegido. Por lo tanto, antes de aplicar cualquier corrección, será necesario calcular los esfuerzos principales y las direcciones principales. (Malvern, 1969) (Esqueda, 2005).



*Líneas de falla en el círculo de Mohr-Coulomb*



*Nota: Círculo de Mohr-Coulomb denota la línea de falla para definir la relación de esfuerzos principales dentro de la envolvente de falla (Juarez & Rico, 1973).*

Este procedimiento se refiere únicamente al tratamiento de esfuerzos con incrementos de carga que son siempre positivos. Es decir, se supone que la relación esfuerzo deformación, si bien no es lineal, tiene una solución única. Por tanto, el modelo no es utilizable para situaciones donde se presenten ciclos de carga y descarga, para los cuales es necesario el uso de la teoría general de la plasticidad, donde las relaciones constitutivas no son únicas, siendo importante entonces la historia de carga en el tiempo. Ese método se basa en el concepto de superficie de fluencia, y para obtenerla existen numerosas teorías aplicables a distintos tipos de materiales, siendo en suelos las más importantes la de Mohr-Coulomb y la aproximación de Drucker-Prager (Drucker, 1952).

- **Subrasante:**

Se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento (Araujo, Diego 2005). Desde hace 80 años concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades

ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje. Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos.

Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, compresión simple son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas tales como el ensayo del módulo resiliente, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- **Propiedades físicas:** son usadas para selección de materiales, detalle técnico de construcción en la caracterización y durabilidad frente a los factores externos.
- **Propiedades mecánicas:** Define el comportamiento de los suelos en relación a su resistencia y parámetros de cálculo estructural, en este caso infraestructuras viales que cumplan con el periodo la resistencia en su estado elástico.

### **2.3. Definición de Términos.**

- **Métodos Numéricos:** Los métodos numéricos son aplicaciones de algoritmos por las cuales es posible formular y solucionar problemas matemáticos usando operaciones aritméticas menos complejas. Ellos también se conocen como métodos indirectos.

- **Método de los elementos finitos:** Es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que el continuo se divide en un número **finito** de partes, “**elementos**”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número **finito** de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”.
  
- **Método Newton Raphson:** En análisis numérico, el método de Newton (conocido también como el método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier) es un algoritmo para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. También puede ser usado para encontrar el máximo o mínimo de una función, encontrando los ceros de su primera derivada.
  
- **Subrasante:** Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimentación y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

- **Modelos Constitutivos:** Los modelos constitutivos son expresiones matemáticas que expresan la relación esfuerzo-deformación de un material. Todos los aspectos que influyen en la respuesta mecánica del suelo bajo condiciones determinadas de carga no es posible tenerlas en cuenta, por lo tanto, se necesitan idealizaciones, tanto del material como de las condiciones de carga, para simplificar la expresión matemática. Estas idealizaciones incorporan las principales propiedades del material, excluyéndose los aspectos considerados de menor importancia (Wulfsohn y Adams, 2002).
  
- **Modelo Mohr Coulomb:** La teoría de Mohr-Coulomb es un modelo matemático (ver *Superficie de fluencia*) que describe la respuesta de materiales quebradizos, tales como hormigón, o agregados de partículas como el suelo,<sup>1</sup> a esfuerzo cortante, así como tensión normal. La mayoría de los materiales en ingeniería clásica se comportan siguiendo esta teoría al menos en una parte del corte. En general, la teoría se aplica a los materiales para los que la resistencia a la compresión es muy superior a la resistencia a la tracción, caso de los materiales cerámicos. La teoría explica que el corte de un material se produce para una combinación entre tensión normal y tensión tangencial, y que cuanto mayor sea la tensión normal, mayor será la tensión tangencial necesaria para cortar el material.
  
- **Propiedades Geotécnicas:** Las Características Geotécnicas del Terreno describen la morfología de los suelos, identificándolos y clasificándolos para que, mediante una serie de estudios de laboratorio y de campo - In Situ- tales



como pozos, catas, sondeos, etc., se tengan los datos necesarios para realizar los cálculos de las cimentaciones.

- **Calicata:** La calicata es un método que proporciona información fiable y completa del suelo. Permite, a través de una inspección visual del terreno "in situ", tomar de muestras, y/o realización de ensayos de campo. Uno de los recursos más importantes y posiblemente el menos conocido es el suelo.

## **2.4. Formulación de Hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis General.**

- **$HG_A$ :** La aplicación del método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
- **$HG_0$ :** La aplicación del método de elementos finitos no permitirá evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

### **2.4.2. Hipótesis Específicas.**

#### **Hipótesis Específica 1:**

- **$HE1_A$ :** Determinar las características geotécnicas permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
- **$HE1_0$ :** Determinar las características geotécnicas no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

#### **Hipótesis Específica 2:**

- **$HE2_A$ :** Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

- **HE2<sub>0</sub>**: Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

**Hipótesis Específica 3:**

- **HE3<sub>A</sub>**: Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
- **HE3<sub>0</sub>**: Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

**2.5. Identificación de variables**

- **Variable Independiente**

Método de Elementos Finitos

- **Variable Dependiente**

Subrasante

- **Variable Interviniente**

Carga Vehicular

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores.

**Tabla 1**

*Variables y dimensiones de la investigación (Elaboración propia).*

TIPO	VARIABLE	DIMENSIÓN	SUB DIMENSIÓN	INDICADORES
INDEPENDIENTE	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	Características Geotécnicas	Propiedades Físicas y Mecánicas	Límite líquido Límite plástico Índice de plasticidad Granulometría Peso Específico % Humedad Natural Clasificación de Suelo CBR 95% Humedad Óptima de Compactación Mejor Densidad de Suelo Ángulo de fricción interna Cohesión
		Modelos Constitutivos	Mohr-Coulomb	Ángulo de fricción interna Cohesión Deformación Tangencial Esfuerzo de Corte Esfuerzo Normal
		Comportamiento Elastoplástico	Método de Elementos Finitos	Módulo de Resiliencia Módulo de Young Coeficiente de Poisson Coeficiente de Permeabilidad Esfuerzo Principal Esfuerzo Desviador Esfuerzo de Corte Esfuerzo Normal
DEPENDIENTE	SUBRASANTE			Desplazamiento Deformación Tangencial Deformación Angular Nivel de profundidad de subrasante Nodos Elementos de Mallas

*Nota: Variables con sus dimensiones e indicadores.*

**Definición operacional de las variables.**

**Tabla 2**

*Definición Operacional de Variables (Elaboración propia).*

<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	
<b>VARIABLES</b>	
<b>Variable Independiente:</b> <i>Método de Elementos Finitos</i>	<b>Variable Dependiente:</b> Subrasante
<b>Definición Conceptual:</b> Según (Wilson Rodríguez, 2005). Es un modelo que permite dar soluciones a partir de resolución de ecuaciones diferenciales de derivadas parciales, discretizando cada elemento, relacionándolo por sus nodos e interactuando mediante el modelo constitutivo integrándolo para representar el comportamiento del elemento como un todo, estas soluciones complejas lo realizan mediante un algoritmo para llegar a resultados con aproximaciones de margen de error pequeños.	<b>Definición Conceptual:</b> Según Flores (2015) Se denomina al terreno graduado y compactado que sirve de cimentación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje.  Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades del suelo para determinar las características físicas, mecánicas

	<p>e hidrológicas de la subrasante, mediante ensayos que se determinan en campo tomar las muestras y llevar a laboratorio para obtener valores del comportamiento del suelo, por ello se considera ensayos dinámicos que permitan detallar el comportamiento real de la subrasante con las cargas dinámicas en un periodo establecido.</p>
--	--

**DIMENSIÓN**

**Variable Independiente:**

**Propiedades Geotécnicas:** Según (*María Camila Álvarez Guerra, 2017*) Las propiedades geotécnicas del es imprescindible en toda infraestructura vial ya que es la base fundamental para proponer soluciones técnicas de la infraestructura que se desea construir. Se determinan las propiedades físicas, mecánicas e hidrológicas del material en términos de su capacidad para llevar el peso y soportar las estructuras de apoyo. Las propiedades geotécnicas de los suelos involucran a las características

físicas y químicas que componen el entorno de un suelo	
<p><b>Modelos Constitutivos:</b> Según (Wulfsohn y Adams, 2002). Son representaciones matemáticas que muestran el comportamiento del elemento en análisis con la realidad. De acuerdo al tipo de material que se desee similar se debe conocer las propiedades que tenga con relación a la interacción a los factores ambientales y los esfuerzos a que se somete para determinar su resistencia. Pues se implementa dentro de los parámetros que se comporta. Por ejemplo; el modelo elástico clásico se aplica para materiales homogéneos, isotrópicos y elásticos lineales (Desai, 2005). La fórmula matemática lo interpreta de forma equivalente para determinar cómo se comporta ante cargas constantes y cuál es la resistencia que soporta y las deformaciones que alcanza. Por ejemplo, el suelo no debe ser modelado como elástico debido a que es posible que se produzcan deformaciones permanentes</p>	

después de retirada la carga (Prevost y Popescu, 1996).	
<b>Método de los elementos finitos:</b> Es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que el continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”.	

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de Investigación

Es aplicada donde propone una solución a la investigación planteada de forma práctica.

#### 3.2. Nivel de la Investigación:

Es correlacional, porque se identifica las causas de la variable independiente como efecto se observa y analiza los efectos de la variable dependiente obteniendo los datos se procesa y analiza para poder lograr comprobar la hipótesis del estudio. Según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, pág. 96) *“Este estudio tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto en particular”*.

#### 3.3. Métodos de investigación.

El tipo de estudio de la investigación se define:

- Es ANALÍTICO, porque la finalidad está dentro de causa a efecto.
- Es **TRANSVERSAL**, donde se recopila los datos e un solo momento.



- La investigación es RETROSPECTIVO porque el hecho se inicia después de realizado la investigación.
- Es OBSERVACIONAL porque de acuerdo al hecho se procede a estudiar mediante la observación, se mide, analiza los datos recopilados.

### **Enfoque**

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo porque sigue una secuencia para probar la hipótesis con datos recopilados, medición de variables y generan reportes de resultados interpretados, según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, pág. 3), tiene las siguientes características: *“Planteamientos acotados, Mide fenómenos, Utiliza estadística, Prueba de hipótesis y teoría”*.

### **3.4. Diseño de investigación.**

El diseño de investigación es no experimental porque no se manipula variables de manera intencional y se observa los fenómenos para analizarlos. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2013, pág. 152) “La investigación que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios en los que no hacemos variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables”.

A su vez nuestro tipo de diseño cuantitativo no experimental se clasifica como un diseño de investigación transeccional o transversal porque vamos a recopilar la información en un solo momento y en un tiempo único (Liu, 2008 y Tucker, 2004).

Asimismo, nuestro tipo de diseño no experimental se clasifica como un diseño de investigación transeccional o transversal porque vamos a recopilar la información en un solo momento y en un tiempo único (Liu, 2008 y Tucker, 2004). El propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación

en un momento dado. Es como “tomar una fotografía” de algo que sucede”. A su vez nuestro estudio según el tipo de diseño no experimental transeccional o transversal se clasifica como: diseño transeccional correlacional-causal porque describen relaciones entre sus dos variables de causa efecto, (Hernández, Fernández, & Baptista, 2013, pág. 154).

### **3.5. Población y muestra**

#### **3.5.1. Descripción de la Población.**

El ámbito espacial de nuestra población es la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco (provincias de Pasco y Daniel Alcides Carrión).

#### **3.5.2. Muestra y método de muestreo.**

Nuestra muestra representa 2 calicatas que corresponden a la progresiva 09+760 y la progresiva 16+940 del tramo I de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco.

El criterio será No Probabilístico, porque, según (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), *“Muestra no probabilística o dirigida Subgrupo de la población en la que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de las características de la investigación”*.

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

#### **3.6.1. Técnicas**

Se recopilará los datos mediante la siguiente técnica:

Se realizará la prospección de suelo y se llevara a laboratorio para su análisis, el criterio de selección de nuestra muestra es no probabilística y no se relaciona a lo estadístico y a su vez es observacional, en base a los resultados de los ensayos con los reportes de laboratorio nos basamos como instrumento estándar a dichos resultados.

### 3.6.2. Instrumentos

Para desarrollar esta investigación se seleccionó y validó la muestra de 2 calicatas de la carretera Yanahuanca- Cerro de Pasco, en dicha progresiva se elaboró un instrumento en base a los resultados de los ensayos de laboratorio, por ende, construimos nuestro instrumento con los indicadores necesarios para nuestra investigación extrayendo datos relevantes del resultado del ensayo.

## 3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.

### 3.7.1. Validación de los instrumentos para la recolección de datos

Se valida dicha información según la confiabilidad de la información en base a los instrumentos de recolección de datos que muestre consistencia en los datos, la validez se encuentra enfocado al objetivos y más bases teóricas dentro de la investigación será, donde 5 expertos validarán esta investigación y se aplicara el alfa de Cronbach para calcular el grado de validez.

#### Tabla 3.

*Validación de Expertos*

N°	EXPERTO
1	Mg / Dr.
2	Mg / Dr.
3	Mg/ Dr.

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.7.2. Confiabilidad de los instrumentos para la recolección de datos

Para calcular el grado de confiabilidad se determinará usando el Alfa de Cronbach la muestra para determinar la confiabilidad de los datos.

#### Tabla 4

*Grado de Confiabilidad*

Rangos de $\alpha$	Magnitud
> 0,90	Excelente
0,80 - 0,89	Bueno
0,70 - 0,79	Aceptable
0,60 - 0,69	Cuestionable
0,50 - 0,59	Pobre
< 0,50	Inaceptable

*Fuente: Elaboración propia*

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

#### **3.8.1. Recolección de datos.**

Se elaborará el instrumento de datos relevantes de la muestra de 2 calicatas para llevarlos a laboratorio en base al reporte remitido.

#### **3.8.2. Revisión de los datos.**

Toda información será obtenida de los ensayos mediante los equipos de laboratorio cuyas 3 muestras tendrán variabilidad en los datos para luego promediarlos.

#### **3.8.3. Clasificación y ordenamiento de la información.**

Se clasificarán en dos tipos de datos, las propiedades físicas y las propiedades mecánicas para la investigación.

### **3.9. Tratamiento estadístico**

Para procesar los datos se usará la hoja de cálculo del Excel y se trabajará con el software SPSS y Jamovi. Mediante la prueba de normalidad determinaremos el tipo de prueba estadística paramétrica o no paramétrica para probar nuestra hipótesis, se medirá la confiabilidad del instrumento, trabajando con nivel de significancia con margen de error del 5% ( $p < 0.05$ ) y nivel de confianza del 95%.

Una vez almacenado los datos y procesado para la evaluación del nivel de confiabilidad y validez, se obtendrá mediante la prueba de hipótesis con una comparación de la información de campo y de simulación, en base a la consistencia y validez por el juicio de expertos.

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

Dentro de esta investigación se ha considerado importante la conducta ética y moral induciendo a la colaboración, cooperación y confianza en el proceso de investigación y lograr los objetivos cumpliendo con la responsabilidad social manejando un comportamiento ético, se solicitará los permisos para la toma de las muestras de calicatas de la zona a la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones Pasco cumpliendo con la responsabilidad social manejando un comportamiento ético induciendo a la colaboración, cooperación y confianza en el proceso de investigación.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

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

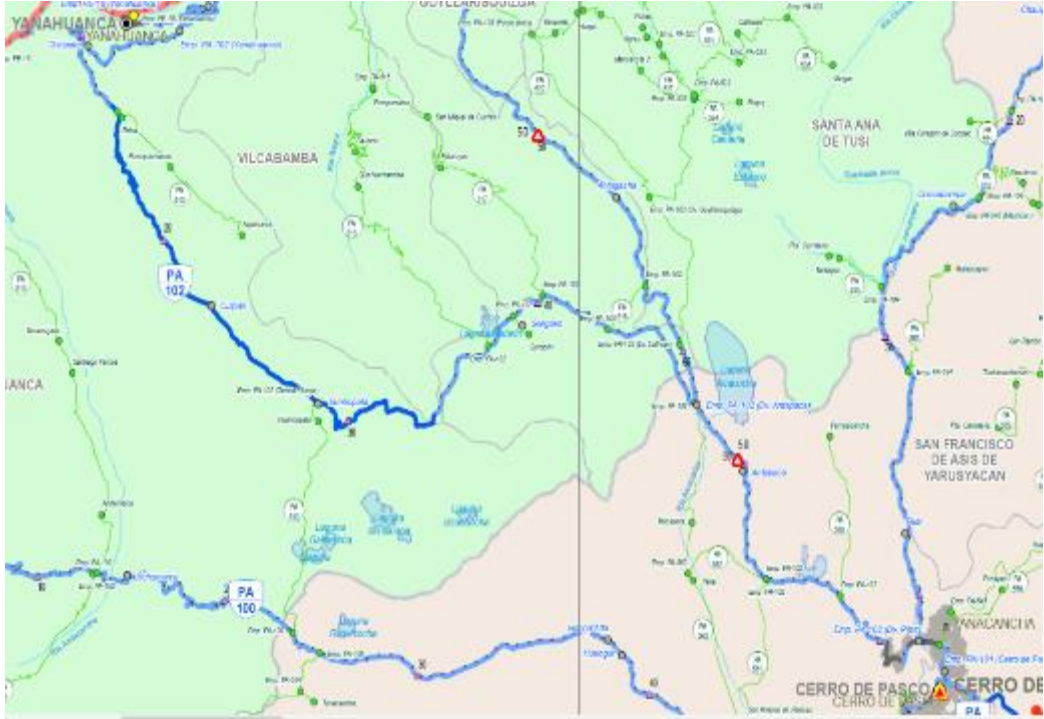
##### **4.1.1. Ubicación Geográfica**

El inicio de la vía departamental se localiza en el Centro Poblado de Paragsha del Distrito de Simón Bolívar, concierne tres tramos, el Tramo 1 que corresponde desde la progresiva 00+000 hasta la progresiva 26+000, el tramo 2 desde la progresiva 26+000 hasta la progresiva 46+740, y el Tramo 3 desde la progresiva 46+740 hasta la progresiva 59+212.

La carretera Yanahuanca-Cerro de Pasco se clasifica por su demanda de flujo vehicular según del Manual de Diseño Geométrico (DG-2018:MTC, 2018, pág. 12) como carretera de segunda clase porque tiene un IMDA de 950 veh/día según (Gobierno Regional de Pasco, 2017, 2022) y es considerado una vía departamental PA-102 (MTC, MAPA VIAL PASCO, HOJA VIAL, 2017).

## Figura 9

Mapa de Ubicación del Proyecto de Investigación



Nota: Mapa de Ubicación de la Vía Departamental Yanahuanca - Cerro de Pasco PA-102 (MTC, MAPA VIAL PASCO, HOJA VIAL, 2017).

### 4.1.2. Acceso

El Tramo de la Carretera Actual comienza en el Km. 00+000 en la localidad de Paragsha con cota 4386.689 m.s.n.m. donde comienza el descenso por la margen izquierda de la laguna de Alcacocho con curvas cuyos radios que cumplen los valores mínimos, luego sigue por una zona de terrenos llanos y accidentados hasta llegar al Km 59+212.55 del Distrito de Yanahuanca.

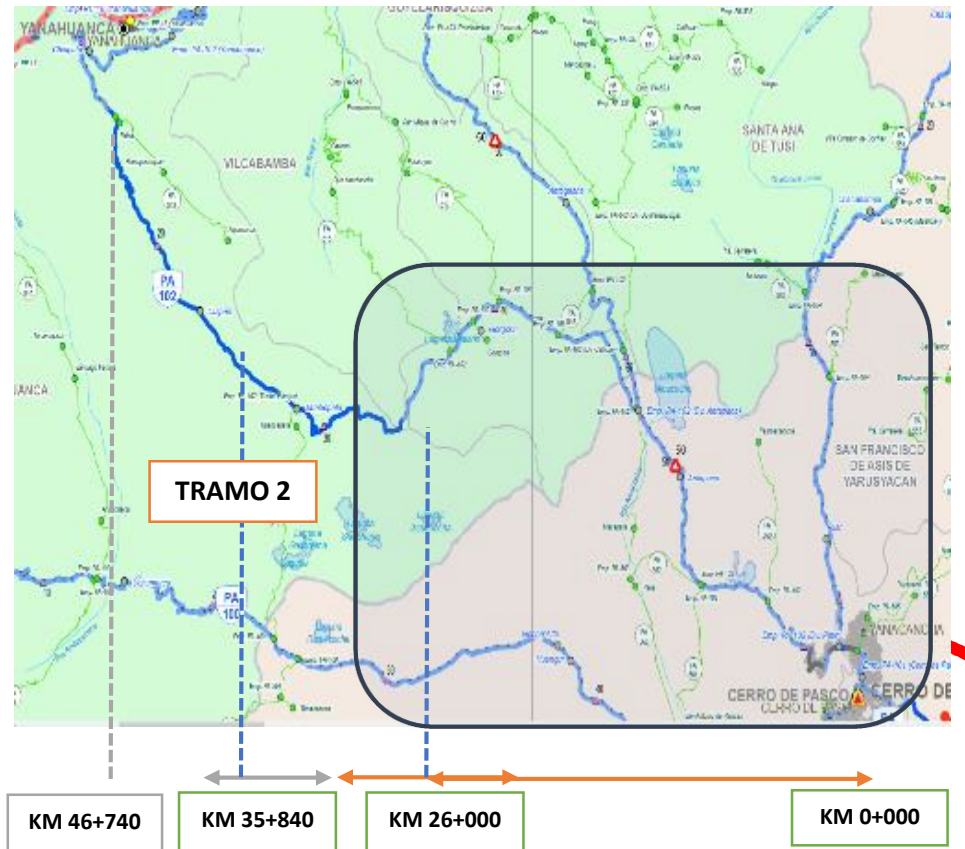
### 4.1.3. Ubicación y evaluación de Calicatas

Dentro del área de influencia considerado dentro del alcance de la investigación, se tiene en cuenta la exploración e investigación de campo entre el intervalo del Tramo I progresivas entre el km 0+000 al km 26+000, y el Tramo II del Km 26+000 al km 35+840 que se encuentra dentro del km 46+740 se delimita

el trabajo de investigación para poder ejecutar las calicatas por lo cual se detalle en la siguiente figura:

**Figura 10**

*Tramos considerados de la vía para el proyecto de investigación (Elaboración Propia).*



Las coordenadas de la ubicación donde se hizo la evaluación para el trabajo de investigación con fines académicos para la ejecución de calicatas, se evaluaron en campo los posibles puntos donde se obtendría la muestra de suelo.

**Tabla 5**

*Coordenadas para la evaluación de realizar posibles calicatas (Elaboración Propia).*

N°	Progresiva	N	E	Cota
1	09+760	0355872	8825879	4204
2	09+760	0355847	8825882	4211
3	09+760	0355861	8825881	4207



4	13+240	0353786	8828317	4264
5	16+940	0351337	8830159	4267
6	25+880	0345025	8827713	4271
7	31+480	0341363	8827331	4114
8	35+840	0337979	8829802	4143

#### **4.1.4. Evaluación de Ubicación para Ejecución de Calicatas**

Para obtener la muestra de suelo y su caracterización y evaluar el comportamiento físico y mecánico de la subrasante se considerarán el número de calicatas para realizar los ensayos en laboratorio y obtener datos, dentro de la guía del , se tomará en cuentas algunos criterios puntuales para obtener la muestra del suelo y los ensayos correspondientes, ya que el manual toma en cuenta para un estudio de expediente técnico, perfil técnico de factibilidad con el fin del diseño de una infraestructura vial.

En este caso los puntos identificados para la ejecución de las calicatas serán analizados con fines académicos para evaluar el comportamiento del suelo a nivel de subrasante, ya que cada capa del pavimento flexible existente en esta vía se distribuyen esfuerzos por las cargas dinámicas de vehículos donde cada capa absorbe las cargas según sus características del material y su resistencia elastoplástica, en este caso se tomará cada calicata de forma puntual de análisis de la subrasante de acuerdo a los datos que se obtenga de laboratorio y realiza el comparativo con el simulador con un software de su comportamiento de esfuerzo deformación en un intervalo de tiempo. Para ello se detalla los puntos identificados para realizar la muestra de suelo mediante la ejecución de calicatas o pozos exploratorios de la subrasante para el estudio de mecánica de suelos y los

criterios considerados para garantizar la seguridad y no afectación en el trabajo a realizar para los pobladores y los vehículos en su transitabilidad.

- **Progresiva 09+760**

Se realizó el registro de coordenadas UTM en la progresiva 09+760 del margen izquierdo de la carretera, se observa una pendiente de material arenoso arcilloso y vegetación corta de ichu, no es posible que en caso se requiera realizar una calicata no representaría el tipo del material ya que se encuentra a desnivel del pavimento flexible y repercute mayor costo, rendimiento y seguridad ejecutar una calicata en este punto.

**Figura 11**

*Progresiva 09+760, margen izquierdo.*



*Nota: Registro de coordenadas UTM en la progresiva 09+760 del margen izquierdo de la carretera.*

En el margen derecho la progresiva 09+760 de la carretera, se observa una plataforma de 7 metros como máximo de una plataforma aproximadamente con material de grava, restos de arena gruesa, presencia de ojos de agua por

acumulación de lluvia, restos de material de la carpeta asfáltica, no se aprecia un colindante de vivienda rural que pueda ser afectada, en la margen derecha aguas abajo se aprecia el Rio Atcacocho.

### **Figura 12**

*Progresiva 09+760, margen derecha.*



*Nota: Toma de punto en el margen derecho de la carretera, progresiva 09+760.*

En el margen derecho la progresiva 09+760 de la carretera, se observa que no existen predios rurales que puedan ser afectados al poder ejecutar una calicata, también en caso de que transiten pobladores y ganado existe un amplio espacio para su transitabilidad, así también el Rio Atcacocho se encuentra en promedio a 20 metros de distancia de la plataforma existente al margen derecho de la carretera y a un desnivel de 10 metros, por cual se considera un punto apropiado para poder realizar una calicata a 5 metros de la carretera de forma segura sin afectar a los pobladores, el tránsito y su seguridad.

### Figura 13

Evaluación de calicata 1 de la progresiva 09+760.



Nota: Margen derecho de la carretera, progresiva 09+760, que es considerado apropiado para la ejecución de una calicata.

Se han tomado tres puntos, dos en el margen izquierdo y uno en el margen derecho de la vía, donde en la zona del margen derecho se está considerando para la toma de muestra de la calicata a ejecutarse.

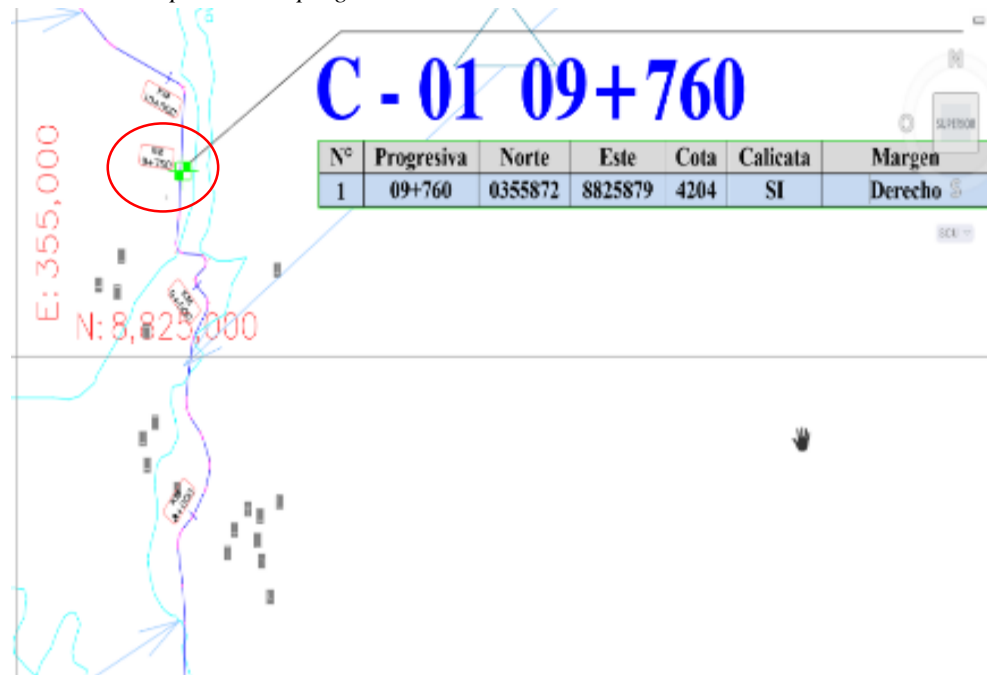
### Tabla 6

Evaluación para elegir la zona apropiada la calicata 1 en la progresiva 09+760.

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata	Margen
1	09+760	0355872	8825879	4204	SI	Derecho
	09+760	0355847	8825882	4211	NO	Izquierdo
	09+760	0355861	8825881	4207	NO	Izquierdo

**Figura 14**

Ubicación en el plano de la progresiva 09+760.



*Nota: Ubicación en el plano se considera la calicata 1 en el margen derecho de la progresiva 09+760*

- **Progresiva 13+240**

Se han tomado registro de coordenadas UTM en el margen derecho de la progresiva 13+240, donde se observa grandes ojos de agua, existe en ambos márgenes cercos de púas, se muestra en esta ubicación como zona arqueológica intangible de Ucuchacra, se observa puertas de corral y muros de material de adobe cerca de la carretera, en caso se ejecute una calicata se contaminará las aguas acumuladas y afecte negativamente el tránsito de pobladores y el paso de ganado.



### Figura 15

*Margen derecho e izquierdo de la progresiva 13+240.*



*Nota: Margen derecho e izquierdo de la carretera, progresiva 13+240, que es considerado inapropiado para la ejecución de una calicata.*

Se considera que realizar una calicata en la progresiva 13+240 es inapropiada y se descarta esta zona.

### Tabla 7

*Detalle de la calicata 2 en la progresiva 13+240.*

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata
2	13+240	0353786	8828317	4264	NO

### - Progresiva 16+940

En la Progresiva 16+940 se observa en el margen izquierdo de la carretera un cerco de púas a 2 metros de la cuneta y no existe acceso para, también existe

un desnivel de 1 metro en promedio del margen izquierdo y la superficie del pavimento flexible donde no es posible realizar una calicata en esta zona.

### **Figura 16**

*Margen izquierdo de la progresiva 16+940.*



*Nota: Margen izquierdo de la carretera, progresiva 16+940, que es considerado inapropiado para la ejecución de una calicata.*

En el margen derecho de la carretera existe pequeños ojos de agua, se observa un cerco de púas a una distancia de 10 metros en promedio del borde la calzada, también se observa restos de carpeta asfáltica acumulado por la reposición del material bituminoso en el proceso de intervención de mejoramiento de la vía hay un desnivel de 30 – 40 centímetros, no se observa puertas de corral y en caso se ejecute una calicata en esta zona los pobladores y sus ganados podrán transitar sin ningún inconveniente existiendo un acceso amplio en este margen para su transitabilidad, por lo tanto a una distancia de 6 metros de la vía es posible realizar una calicata aplicando las normas de seguridad correspondiente sin afectar los predios rurales, la transitabilidad de peatones y de vehículos.

### Figura 17

Margen derecho de la progresiva 16+940.



*Nota: Margen derecho de la carretera, progresiva 16+940, la zona es apropiada para la ejecución de una calicata.*

Se considera realizar una calicata en el margen derecho donde en este punto se toma las coordenadas.

### Tabla 8

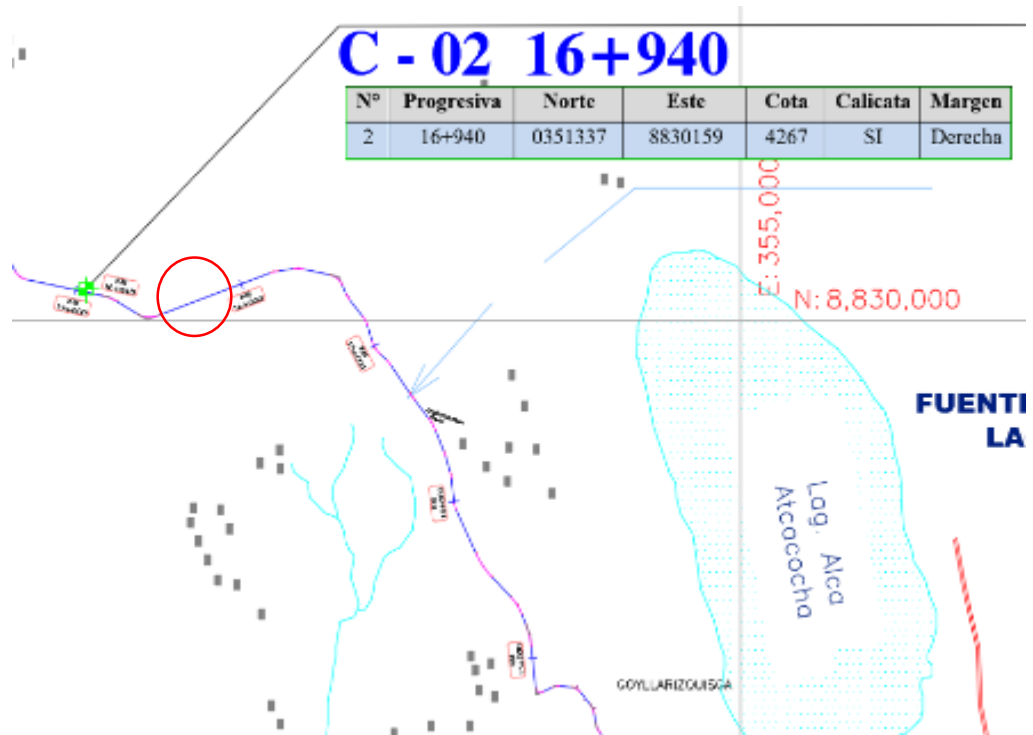
Detalle de la calicata 2 en la progresiva 16+240.

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata	Margen
2	16+940	0351337	8830159	4267	SI	Derecha



**Figura 18**

Ubicación en el plano de la progresiva 09+760.



Nota: Ubicación en el plano que se considera la calicata 2 en el margen derecho de la progresiva 16+940.

- **Progresiva 25+880**

En el margen izquierdo de la progresiva 25+880 se observa cerco de púas y se encuentra a 0.5 metros de la cuneta en promedio, no es posible realizar una calicata porque no existe un área disponible para la excavación del pozo exploratorio donde comprometería al cerco y al drenaje longitudinal en caso se realice una excavación.

## Figura 19

*Margen izquierdo de la progresiva 25+760.*



*Nota: Margen Izquierdo de la carretera, progresiva 25+880, la zona no es apropiada para la ejecución de una calicata existe un cerco de malla de púas y se encuentra muy cerca a la cuneta de la vía.*

En el margen derecho de la progresiva 25+880 se observa un cerco de púas y se encuentra a 8 metros de la cuneta de la vía en promedio, se encuentra restos de material de carpeta asfáltica de la reposición realizada del mantenimiento de la vía, material granular y vegetal, no existe puertas de corral ni construcción de predios que puedan ser afectados, existe derecho de paso en la zona para peatones en caso se realice una calicata y no se afectaría el tránsito de los vehículos ni se afectaría a la infraestructura vial, por lo cual es apropiada para poder realizar una calicata.

## Figura 20

Margen derecho de la progresiva 25+880.



*Nota: Margen derecho de la progresiva 25+880 se observa un cerco de púas y se encuentra a 8 metros de la cuneta de la vía en promedio, es apropiada para poder realizar una calicata.*

Se considera realizar una calicata en el margen derecho donde en este punto se toma las coordenadas.

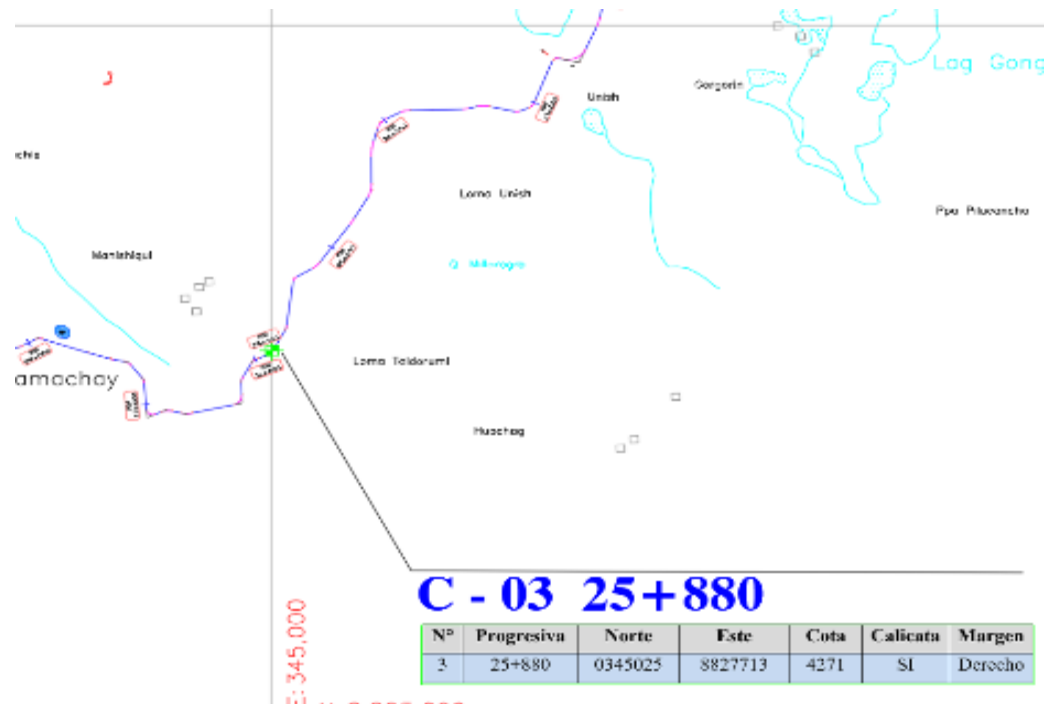
## Tabla 9

Detalle de la calicata 3 en la progresiva 25+880.

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata	Margen
3	25+880	0345025	8827713	4271	SI	Derecho

## Figura 21

Ubicación en el plano de la progresiva 25+880.



Nota: Plano de ubicación, Margen derecho de la progresiva 25+880 que se considera la calicata 3.

### - Progresiva 31+480

En el margen izquierdo de la progresiva 31+480 se observa un talud con alta pendiente, con material arcilloso y con pequeños deslizamientos por precipitaciones en la zona, al pie del talud se observa la cuneta y que no es posible realizar una calicata generaría un alto riesgo donde afectaría a la estabilidad del talud, a la transitabilidad y la seguridad vial.

## Figura 22

*Margen izquierda de la progresiva 31+480.*



*Nota: Margen Izquierda de la carretera, progresiva 31+480, se observa un talud de material arcilloso de alta pendiente.*

En el margen derecho de la progresiva 31+480 existe una plataforma, se observa un cerco de púas, desde la berma de la vía hasta el cerco de púas mide en promedio 5 metros el cual delimita una pendiente relativamente pronunciada donde colinda con el Río Huancamachay que se encuentra a 32 metros de la vía por el margen derecho aguas abajo.

También se observa que no colinda con predios rurales y el tránsito de los pobladores y de ganado lo realiza cerca al río, esta zona donde se encuentra el material del suelo arcilloso es factible para poder realizar una calicata no afecta la vegetación porque se encuentra cercado proporcionando seguridad por la delimitación para la transitabilidad y la vegetación existente.



### Figura 23

Margen derecha de la progresiva 31+480.



*Nota: Margen Derecha de la carretera, progresiva 31+480, se observa una plataforma colindante con un cerco de púas delimitando con la pendiente con vegetación y el Río Huancamachay, se considera realizar una calicata en esta zona.*

Se considera realizar una calicata en el margen derecho donde en este punto se toma las coordenadas.

### Tabla 10

Detalle de la calicata 3 en la progresiva 31+480

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata	Margen
4	31+480	0341363	8827331	4114	SI	Derecho

## Figura 24

Plano de ubicación de la progresiva 31+480.



Nota: Plano de ubicación, Margen Derecha de la carretera, progresiva 31+480 que se considera la calicata 4.

### - Progresiva 35+840

En el margen izquierdo de la Progresiva 35+840 se observa un cerco de púas colindando con un riachuelo, entre la berma de la vía y el cerco mide un promedio de 2.5 metros, donde no es posible realizar una calicata por el riesgo de contaminar el riachuelo y al estar dentro de la transición de la curva entre la progresiva 35+800 y 35+900 de la vía se genera un riesgo de seguridad en la transitabilidad de los vehículos.

## Figura 25

*Margen izquierda de la progresiva 35+840.*



*Nota: Margen Izquierda de la carretera, progresiva 35+840, se observa un cerco de púas colindando con un riachuelo, entre la berma de la vía y el cerco mide un promedio de 2.5 metros, donde no es posible realizar una calicata.*

En el margen derecho de la Progresiva 35+840 se observa muros de piedra construido por los pobladores de la zona que colinda con la vía, material del suelo areno arcillosa, grava y material con piedras de canto rodado, existe ojos de agua y material del suelo saturado, por lo cual se considera no realizar una calicata porque existe el riesgo de contaminar el agua y existir probablemente conducto de agua subterránea que forma pequeñas lagunas donde beben los animales y ganado de la zona.



## Figura 26

*Margen derecha de la progresiva 35+840.*



*Nota: En el margen derecho de la Progresiva 35+840, no se considera realizar una calicata.*

Por lo tanto, no se considera este punto para la ejecución de una calicata.

## Tabla 11

*Detalle de la ubicación de en la progresiva 35+840*

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata	Margen
	35+840	0337979	8829802	4143	NO	Derecha

En resumen, se está considerando cuatro calicatas en los siguientes puntos de coordenadas evaluadas para la ejecución de calicatas:

## Tabla 12

*Detalle de la evaluación de posibles calicatas a realizarse.*

N°	Progresiva	Norte	Este	Cota	Calicata	Margen
1	09+760	0355872	8825879	4204	SI	Derecha

	09+760	0355847	8825882	4211	NO	
	09+760	0355861	8825881	4207	NO	
	13+240	0353786	8828317	4264	NO	
<b>2</b>	<b>16+940</b>	<b>0351337</b>	<b>8830159</b>	<b>4267</b>	<b>SI</b>	<b>Derecha</b>
<b>3</b>	<b>25+880</b>	<b>0345025</b>	<b>8827713</b>	<b>4271</b>	<b>SI</b>	<b>Derecha</b>
<b>4</b>	<b>31+480</b>	<b>0341363</b>	<b>8827331</b>	<b>4114</b>	<b>SI</b>	<b>Derecha</b>
	35+840	0337979	8829802	4143	NO	

#### 4.1.5. Ejecución de calicatas

En el manual: (MTC, Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2013, pág. 31) en el Cuadro 4.1 muestra el número de calicatas a realizar para considerar dentro de un estudio de mecánica suelos con el fin de diseñar una infraestructura vial para la ejecución de una obra, dentro del Manual de Diseño Geométrico (DG-2018:MTC, 2018, pág. 12), según el criterio de clasificación de carreteras, la carretera Yanahuanca-Cerro de Pasco tiene un IMDA de 950 veh/día (Gobierno Regional de Pasco, 2017, 2022) de acuerdo al expediente técnico actualizado en el [invierte.pe](http://invierte.pe).

Según lo mencionado se clasifica en Carretera de Segunda Clase, donde sugiere una excavación mínima de 1.5m metros y 3 calicatas por kilómetro con fines de construcción de una infraestructura vial, en nuestro caso la investigación solo se evaluará uno de los puntos críticos de la subrasante en este caso de baja resistencia a las cargas de los vehículos para simular cómo se comporta a al aplicar las cargas y los esfuerzos generados y que aporte técnico se va a sugerir al obtener los datos del comportamiento elastoplástico de la subrasante como cimiento de la infraestructura vial existente.

**Figura 27**

*Cuadro de número de calicatas para realizar calicatas.*

**Cuadro 4.1**  
**Número de Calicatas para Exploración de Suelos**

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número mínimo de Calicatas	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido</li> </ul>	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido</li> <li>Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido</li> </ul>	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>4 calicatas x km</li> </ul>	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
<b>Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles.</b>	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 calicatas x km</li> </ul>	
Carreteras de Tercera Clase: carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 calicatas x km</li> </ul>	
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 calicata x km</li> </ul>	

Fuente: Elaboración Propia, teniendo en cuenta el Tipo de Carretera establecido en la RD 037-2008-MTC/14 y el Manual de Ensayo de Materiales del MTC

*Nota: La carretera Yanahuanca-Cerro de Pasco se clasifica como carretera de segunda clase, nos sugiere 3 calicatas por kilómetro en este caso un estudio con fines de construcción de una infraestructura vial, pero en nuestra investigación no aplica porque solo evaluaremos el comportamiento estructural de la subrasante por progresiva. (MTC, Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2013).*

Cada Calicata se considera como un punto de análisis independiente del comportamiento de la vía en la investigación académica, el cual como forma representativa se está considerando dos calicatas para el Tramo I y dos calicatas para el Tramo II, por lo cual no se está considerando el cuadro anterior como referencia, pero si se considera las normas técnicas para realizar el ensayo de estudio de mecánica de suelos con el fin de obtener datos del suelo que representen de forma eficiente su comportamiento físico-mecánico.

Se realizó la evaluación de la ejecución de calicatas tomando en cuenta los criterios técnicos, sociales y ambientales con el fin de no perjudicar a terceros

dentro del entorno de trabajo en la ejecución de la investigación por lo cual se resume la ejecución de cuatro calicatas:

**Tabla 13**

*Detalle de la ubicación donde se ejecuta las cuatro calicatas para el estudio de mecánica de suelos.*

<b>N°</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Cota</b>	<b>Margen</b>
<b>1</b>	09+760	0355872	8825879	4204	Derecha
<b>2</b>	16+940	0351337	8830159	4267	Derecha
<b>3</b>	25+880	0345025	8827713	4271	Derecha
<b>4</b>	31+480	0341363	8827331	4114	Derecha

**Muestra de la Subrasante:**

Se realizó la muestra de suelo realizando excavación manual de 1 metro por 1 metro a una profundidad de 1.5 metros según (MTC, Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, 2013, pág. 31) como se indica en la Figura 25 siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D 420 Guía para Caracterización del Sitio para Propósitos de Ingeniería, Diseño y Construcción y MTC E 101 Muestreo de Suelos y Rocas donde se detalla en (MTC, Manual de Ensayo de Materiales, 2017, pág. 19) para poder obtener de forma correcta las muestras representativas en campo, seguir el procedimiento requerido y posteriormente realizar los ensayos necesarios para obtener las características físicas y mecánicas de una subrasante.

Para ello, determinaremos las características físicas de la subrasante donde se tomará una muestra en promedio de 10 kilogramos por calicata en los ensayos estandar (en promedio 2 kilogramos para cada ensayo de Analisis Granulométrico, Limite Líquido, Limite Pástico, Indice Plástico, Contendo de

Humedad Natural, Gravedad Específica), el diámetro de las partículas deben ser como máximo 3 pulgadas pero en nuestro caso no se tuvo este inconveniente por que el tipo del material a extraer es un suelo limoso arcilloso de tamaño inferior a 3 pulgadas, y para poder determinar las características mecánicas de la subrasante se realizará ensayos especiales donde se tomará una muestra en promedio de 60 kilogramos (CBR al 95%, Proctor Modificado al 95% y Corte Directo) según indica el ítem “5.0 MUESTRA” (MTC, Manual de Ensayo de Materiales, 2017, pág. 19) donde describe obtener una muestra representativa de suelo, y en la Nota:1 sugiriendo las cantidades del tamaño de la muestra para los tipos de ensayos a realizar.

La carretera Yanahuanca-Cerro de Pasco es un pavimento flexible donde en el primer metro de profundidad se considera de prioridad porque aquí se da la mayor distribución de esfuerzos ante las cargas de los vehículos, por ello desde la carpeta asfáltica hasta la capa de la subbase considerando en promedio 0.70 a 0.80 metros de profundidad posterior a ello se debe evaluar los siguientes 0.40 a 0.60 metros de profundidad para el análisis granulométrico y los ensayos estandar en laboratorio porque la distribución de esfuerzos genera un reacomodo de las partículas del suelo de la subrasante en función a su rigidez y su caracterización del material de la subrasante, luego como cimentación de la infraestructura vial a 1.50 metros de profundidad de la subrasante se debe obtener la muestra para los ensayos especiales en laboratorio.

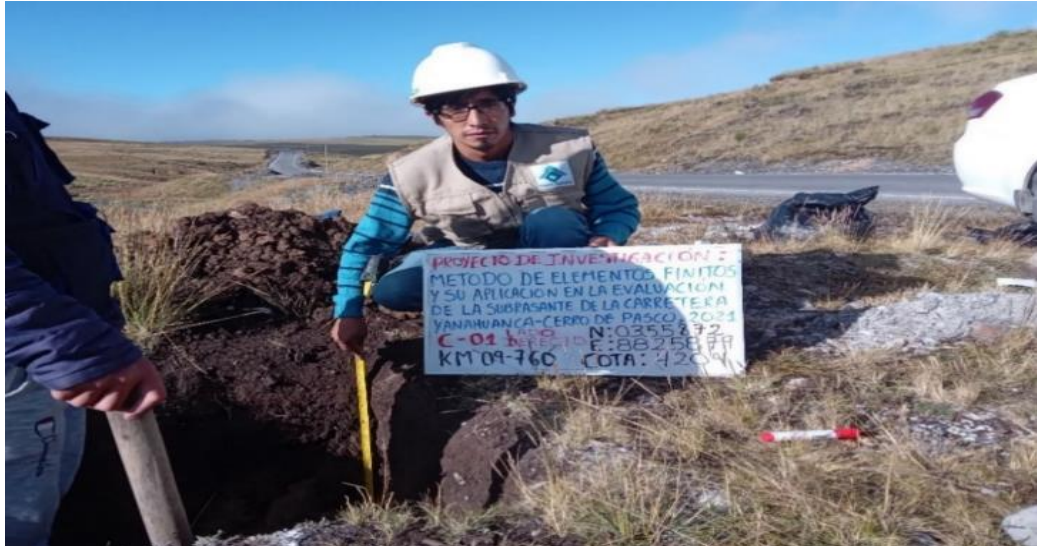
- **Ejecucion de Calicata 01, Progresiva 09+760**



Se realizó la excavación manual para realizar la Calicata 01 y la toma de la muestra de la subrasante en la progresiva 09+760, margen derecho de la carretera en el sentido Cerro de Pasco-Yanahuanca.

**Figura 28**

*Excavación manual de la Calicata 01, Progresiva 09+760 margen derecho, N 0355872, E 8825879, Cota 4204 m.*



Se realizó la excavación hasta 1.5 metros de profundidad del nivel de terreno natural.

**Figura 29**

*Excavación manual de la Calicata 01 a 1.50 metros de profundidad.*



El perfil estratigráfico, a 0.41 metros de material orgánico arcilloso (OL) y 1.09 metros de material Limo Arcilloso de baja plasticidad (CL).

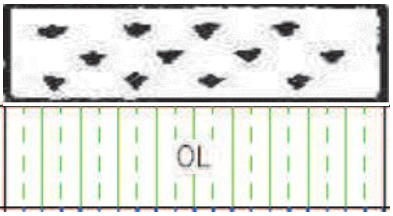
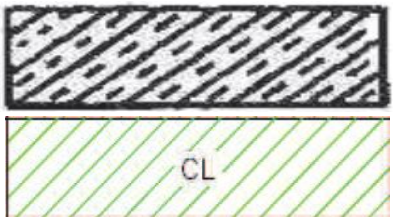
**Figura 30**

*Medida para el perfil estratigráfico de la Calicata 01, Progresiva 09+760 margen derecho, N 0355872, E 8825879, Cota 4204 m*



**Tabla 14**

*Simbología y descripción del perfil estratigráfico de la Progresiva 09+760 margen derecho, N 0355872, E 8825879, Cota 4204 m*

Perfil estratigráfico de la Progresiva 09+760 margen derecho, N 0355872, E 8825879, Cota 4204 m		
Simbología	Clasificación	Profundidad
	ASHTOO: Material orgánico  SUCS: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad (OL)	0.40m
	ASHTOO: Suelo arcilloso plástico (A-6)  SUCS: Limos y arcillas inorgánicas de baja y mediana plasticidad (CL)	1.09m

Se tomó la muestra desde 0.41 metros del nivel del terreno natural, y a 1.50 metros del nivel del terreno natural.



### Figura 31

Toma de muestras de la subrasante, Calicata 01, Progresiva 09+760 margen derecho, N 0355872, E 8825879, Cota 4204 m.

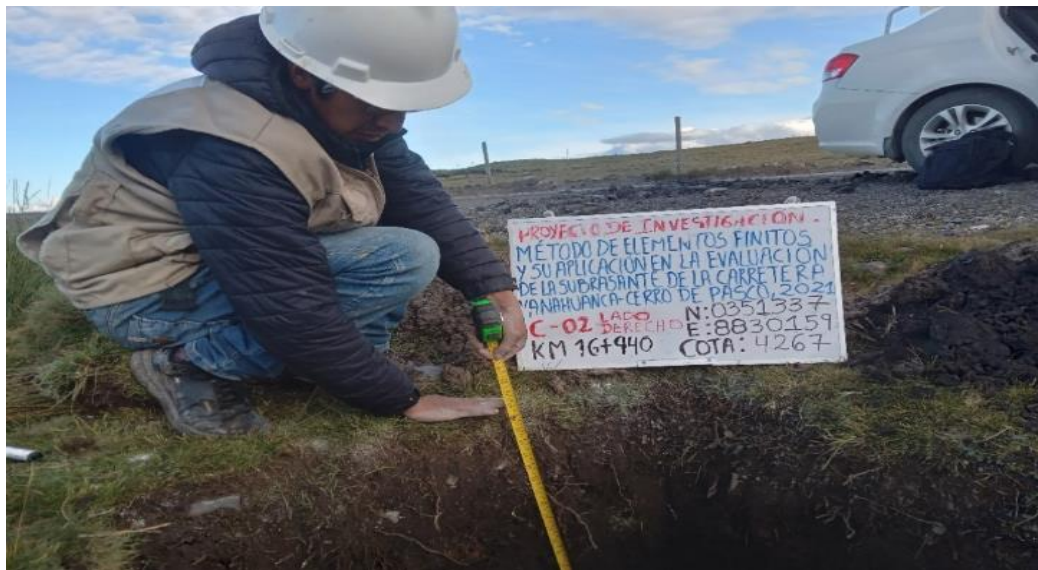


### - Ejecucion de Calicata 02, Progresiva 16+940

Se realizó la excavación manual de la Calicata 02 y la toma de la muestra de la subrasante en la progresiva 16+940, margen derecho de la carretera en el sentido Cerro de Pasco-Yanahuanca.

### Figura 32

Excavación manual de la Calicata 02, Progresiva 16+940 margen derecho, N 0351337, E 8830159, Cota 4267 m.





Se realizó la excavación a 1.5 metros de profundidad del nivel de terreno natural encontrando material limoso arcilloso saturado.

**Figura 33**

*Excavación manual de la Calicata 02 a 1.50 metros de profundidad.*



El perfil estratigráfico, a 0.23 metros con material orgánico arcilloso (OL), 0.42 metros de material arcilloso de baja plasticidad con contenido orgánico (ML), y 0.85 metros de Arcilla arenosa de baja plasticidad (CL).


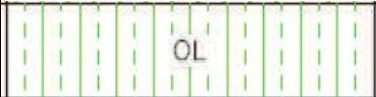



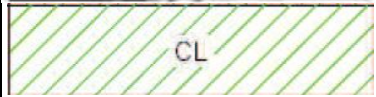
**Figura 34**

*Medida del perfil estratigráfico de la Calicata 02, Progresiva 16+940 margen derecho, N 0351337, E 8830159, Cota 4267 m.*



**Tabla 15**

*Simbología y descripción del perfil estratigráfico de la Progresiva 16+940 margen derecho, N 0351337, E 8830159, Cota 4267 m.*

Perfil estratigráfico de la Progresiva 16+940 margen derecho, N 0351337, E 8830159, Cota 4267 m.		
Simbología	Clasificación	Profundidad
	ASHTOO: Material orgánico SUCS: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad (OL)	0.23m
		
	ASHTOO Suelo arcilloso elástico de mediana plasticidad (A-7-5) SUCS: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad (ML)	0.42m
		
	ASHTOO: Suelo arcilloso plástico (A-6) SUCS: Limos y arcillas orgánicas de baja y mediana plasticidad (CL)	0.85m
		

Se tomó la muestra desde 0.65 metros del nivel del terreno natural, y a 1.50 metros del nivel del terreno natural.

**Figura 35**

*Toma de muestras de la subrasante, Calicata 02, Progresiva 16+940 margen derecho, N 0351337, E 8830159, Cota 4267 m.*





- **Ejecucion de Calicata 03, Progresiva 25+880**

Se realizó la excavación manual de la Calicata 03 y la toma de la muestra de la subrasante en la progresiva 25+880, margen derecho de la carretera en el sentido Cerro de Pasco-Yanahuanca.

**Figura 36**

*Excavación manual de la Calicata 03, Progresiva 25+880 margen derecho, N 0345025, E 8827713, Cota 4271 m.*



Se realizó la excavación hasta 1.5 metros de profundidad del nivel de terreno natural encontrando material arcilloso arenoso.

**Figura 37**

*Excavación manual de la Calicata 03 a 1.50 metros de profundidad.*



Su perfil estratigráfico, a 0.41 metros con material orgánico arcilloso (OL), 0.20 material Limo Arcilloso de baja plasticidad (ML), y 0.89 metros de material arcilloso arenoso de baja plasticidad (CL).


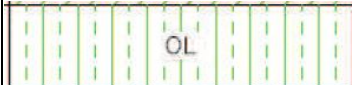

**Figura 38**

*Medida del perfil estratigráfico de la Calicata 03, Progresiva 25+880 margen derecho, N 0345025, E 8827713, Cota 4271 m.*



**Tabla 16**

*Simbología y descripción del perfil estratigráfico de la Progresiva 25+880 margen derecho, N 0345025, E 8827713, Cota 4271 m.*

Perfil estratigráfico de la Progresiva 25+880 margen derecho, N 0345025, E 8827713, Cota 4271 m.		
Simbología	Clasificación	Profundidad
	ASHTOO: Material orgánico SUCS: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad (OL)	0.41m
	ASHTOO Suelo arcilloso elástico de mediana plasticidad (A-7-5) SUCS: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad (ML)	0.20m
	ASHTOO: Suelo arcilloso plástico (A-6) SUCS: Limos y arcillas orgánicas de baja y mediana plasticidad (CL)	0.89m



Se tomó la muestra desde 0.61 metros del nivel del terreno natural, y a 1.50 metros del nivel del terreno natural.

### Figura 39

*Toma de muestras de la subrasante, Calicata 03, Progresiva 25+880 margen derecho, N 0345025, E 8827713, Cota 4271 m.*



### - Ejecucion de Calicata 04, Progresiva 31+480

Se realizó la excavación manual de la Calicata 04 y la toma de la muestra de la subrasante en la progresiva 31+480, margen derecho de la carretera en el sentido Cerro de Pasco-Yanahuanca.

### Figura 40

*Excavación manual de la Calicata 04, Progresiva 31+480 margen derecho, N 0341363, E 8827331, Cota 4114 m.*



Se realizó la excavación hasta 1.5 metros de profundidad del nivel de terreno natural encontrando material arcilloso arenoso.

### Figura 41

*Excavación manual de la Calicata 04 a 1.50 metros de profundidad.*



Su perfil estratigráfico, a 0.28 metros con material orgánico arcilloso (OL), 1.22 Arcilla fina arenosa de baja plasticidad (CL).

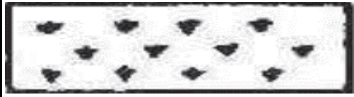
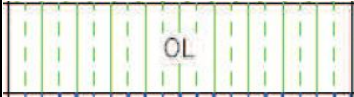

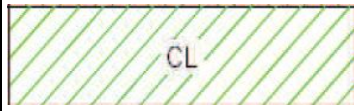
### Figura 42

*Medida del perfil estratigráfico de la Calicata 04, Progresiva 31+480 margen derecho, N 0341363, E 8827331, Cota 4114 m.*



**Tabla 17**

*Simbología y descripción del perfil estratigráfico de la Progresiva 31+480 margen derecho, N 0341363, E 8827331, Cota 4114 m.*

Perfil estratigráfico de la Progresiva 31+480 margen derecho, N 0341363, E 8827331, Cota 4114 m.		
Simbología	Clasificación	Profundidad
 	ASHTOO: Material orgánico  SUCS: Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas, baja plasticidad (OL)	0.28m
 	ASHTOO: Suelo arcilloso plástico (A-6)  SUCS: Limos y arcillas orgánicas de baja y mediana plasticidad (CL)	1.22m

Se tomó la muestra desde 0.40 metros del nivel del terreno natural, y a 1.50 metros del nivel del terreno natural.

**Figura 43**

*Toma de muestras de la subrasante, Calicata 04, Progresiva 31+480 margen derecho, N 0341363, E 8827331, Cota 4114 m.*





#### **4.1.6. Elaboración de ensayos en laboratorio**

Según el Manual de Ensayos de materiales del MTC (MTC, Manual de Ensayo de Materiales, 2017, pág. 19), para obtener las características físicas y mecánicas del suelo obtenido de las calicatas en campo se están considerando estos realizar estos ensayos en laboratorio para este estudio:

##### **Ensayos Estándar**

- Análisis granulométrico por tamizado MTC E 107.
- Humedad natural MTC E 108
- Determinación del límite líquido MTC E 110
- Determinación del límite plástico MTC E 111
- Gravedad específica de los suelos MTC E 113.

##### **Ensayos Especiales**

- Proctor Modificado MTC E 115.
- CBR al 95% MTC E 132.
- Corte Directo MTC E 123

Se realizó los ensayos de laboratorio en la empresa GeoEstructuras SAC en la ciudad de Huánuco cumpliendo todos los procedimientos dentro de la norma técnica que se exige, se escogió las calicatas C-01 y C-02 para realizar dichos ensayos considerados como muestras más críticas en base a la humedad de la muestra y nivel freático encontrado en campo, asimismo el uso de los equipos que se requiere tienen la certificación de calibración para la confiabilidad de los resultados obtenidos.



## Ensayos Estándar

Se envió a Laboratorio de Suelos para poder obtener la información de las características físicas de las muestras de suelo de subrasante, donde se consideraron los siguientes ensayos estándar:

Para cada muestra alterada obtenida se procedió a pesar en la balanza en su estado natural y seco respectivamente, registrarlo el cual se siguió los procedimientos según la normativa técnica respectiva para los ensayos de Contenido de Humedad (MTC E 108) y también determinar los Ensayos de Límites de Atterberg – NTP 339.129 (Límite Líquido MTC E 110, ASTM D-423 y Límite Plástico MTC E 111, ASTM D-424) y Gravedad Específica de los suelos (MTC E 113, ASTM D - 854-02).

## Figura 44

*Muestras de suelo de subrasante para realizar los ensayos en laboratorio.*



**Figura 45**

*Muestras de suelo de subrasante para obtener su peso antes y después de secado.*



**Figura 46**

*Registro del peso de las muestras de suelo de subrasante antes y después del secado.*





**Figura 47**

*Ensayo de Análisis Granulométrico por tamizado (MTC E 107, NTP 339.128).*



**Figura 48**

*Chancado de las partículas de la muestra seca con el martillo de goma para los ensayos Estándar y ensayos Especiales.*



**Ensayos Especiales**

Una vez chancado las partículas de la muestra seca se procedió a llenar a los moldes y realizar los ensayos de proctor modificado (MTC E 115), CBR (MTC E 132, ASTM D 1883 - 73) y el ensayo de Corte Directo (MTC E 123, ASTM D - 3080, AASHTO T - 236) según los procedimientos exigidos por las normas técnicas correspondientes.

Para el ensayo de Proctor Modificado se procedió a llenar tres capas en tres muestras moldes de la muestra añadiendo un porcentaje de agua y luego compactarlo con 56 golpes cada capa y extraer la representación de porcentaje de humedad y compactación, y luego realizar el ensayo CBR se sumergió 7 días se registró la carga según la penetración de 0.1 pulgadas en 10, 25 y 56 golpes para obtener el porcentaje de resistencia de subrasante de la muestra.

Luego se realizó el ensayo de corte directo en un molde de 3 espécimen midiendo el esfuerzo tangencial y normal con respecto a su deformación de la muestra para medir la resistencia del suelo, cohesión y el ángulo de fricción.

#### **Figura 49**

*Registro del peso del molde de 11.5cm x 15 cm y de la muestra seca para el ensayo de Proctor Modificado.*





**Figura 50**

*Registro del peso del molde de 11.5cm x 15 cm y de la muestra seca para el ensayo de Proctor Modificado.*



**Figura 51**

*Compactación en tres capas de 56 golpes para el ensayo de Proctor Modificado.*



**Figura 52**

*Peso del molde con la muestra y peso de la muestra representativa compactada para los tres moldes con los diferentes porcentajes de humedad.*



**Figura 53**

*Muestras sumergidas de 4 días para el ensayo de CBR de 10, 25 y 56 golpes de 0.1 pulgadas de penetración.*





**Figura 54**

*Se extrae las muestras sumergidas para pesarlo y ponerlo en la máquina para la penetración del pistón y registrar la carga y la profundidad de penetración ejercida.*



**Figura 55**

*Se registra las cargas y penetración con velocidad de 0.05pulgadas por minuto controlado mediante el deformímetro, luego se desmonta el molde para realizar el mismo procedimiento con las demás muestras.*



**Figura 56**

*Se prepara la muestra de 50 mm de diámetro por 12 mm de espesor y se ensambla en la caja de corte colocando previamente entre las piedras porosas.*



**Figura 57**

*Se la caja de corte aplicando grasa para impermeabilizar, se coloca al equipo ajustando el dial de lectura de deformación durante el corte, se configura los parámetros en el equipo para iniciar la lectura de corte de los tres especímenes.*





**Figura 58**

Una vez realizado el ensayo de corte directo se retira la caja de corte posteriormente para tomar el peso de la muestra seca.



## 4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

### 4.2.1. Resultados de Laboratorio:

**C-01, PROG. 09+760. E: 355872. N: 8825879. COTA: 4,204.00 msnm**

- **Propiedades Físicas:**

**Tabla 18**

*Datos del ensayo: Contenido de humedad de la muestra C-01 según la normativa MTC E 108.*

<b>Ensayo: Contenido de Humedad C-01, MTC E 108</b>					
<b>MUESTRA</b>		<b>M - 1</b>	<b>M - 2</b>	<b>M - 3</b>	<b>M - 4</b>
Peso de la Muestra húmeda + Tara	gr.	257.9	241.2	193.2	245.7
Peso de la Muestra Seca + Tara	gr.	223.1	213.3	168.7	212.8
Peso de la Tara	gr.	38.4	38.4	37.9	38.0
Peso del agua	gr.	34.8	27.9	24.5	32.9
Peso de las Partículas Solidas	gr.	184.7	174.9	130.8	174.8
Contenido de Humedad	%	18.8	16.0	18.7	18.8
<b>Contenido de Humedad del Suelo, (%) =</b>			<b>18.09 %</b>		

**Tabla 19**

Datos del ensayo: *Peso Específico C-01, según la normativa ASTM D - 854-02.*

<b>Ensayo: Peso Específico C-01, ASTM D - 854-02</b>					
MUESTRA	UNIDAD	1	2	3	4
Peso de la muestra + matraz	gr.	198.00	178.00	248.00	175.00
Peso de la muestra + agua	gr.	627.00	619.00	652.00	618.00
Peso del matraz	gr.	65.00	65.00	65.00	65.00
Volumen del ensayo	cm <sup>3</sup> .	500.00	500.00	500.00	500.00
Peso específico del agua	gr/cm <sup>3</sup>	1.00	1.00	1.00	1.00
Peso de la muestra	gr.	133.00	113.00	183.00	110.00
Volumen de la muestra	cm <sup>3</sup> .	71.00	59.00	96.00	57.00
Volumen del agua	cm <sup>3</sup> .	429.00	441.00	404.00	443.00
Peso específico de la muestra	gr/cm <sup>3</sup>	1.87	1.92	1.91	1.93
Promedio	gr/cm <sup>3</sup>	<b>1.91</b>			

**Tabla 20**

Datos del ensayo: *Límites de Atterberg y Clasificación del Suelo C-01, según la normativa NTP – 339.129.*

<b>LIMITES DE ATTERBERG</b>	
Límite líquido LL	46.42%
Límite plástico LP	31.64%
Ind. de Plasticidad IP	14.78 %

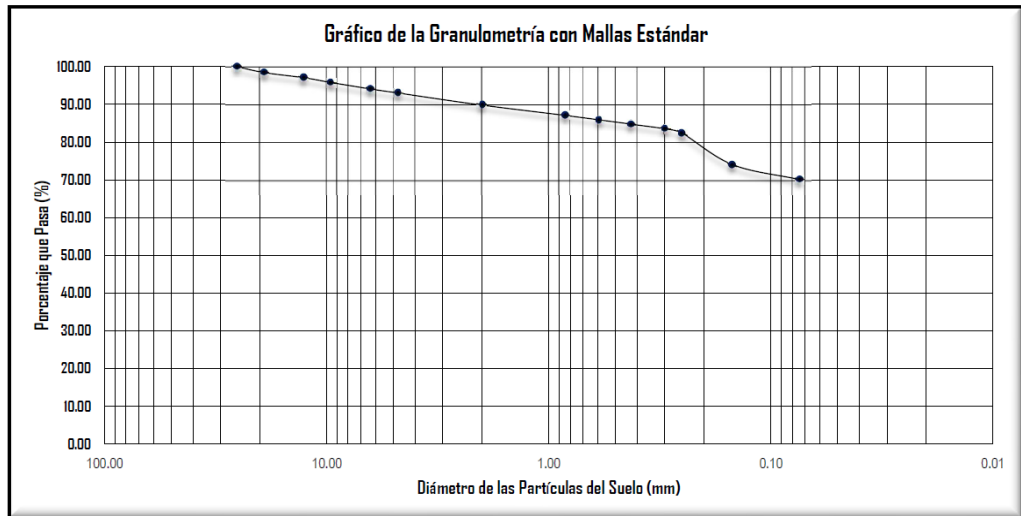
**Tabla 21**

Datos del ensayo: *Análisis Granulométrico C-01, según la normativa NTP – 339.128.*

<b>GRANULOMETRÍA</b>	
Porcentaje Grava	7.01%
Porcentaje de Arena	22.91%
Porcentaje Limo-Arcilla	70.08%
Material granular equivalente a:	29.92%
Pasa tamiz N.º 4:	92.985%
Pasa tamiz N.º 200:	70.077%
D60(díámetro efectivo):	0.06 mm
D30(díámetro efectivo):	0.03 mm
D10 (díámetro efectivo):	0.01 mm
Coef. de uniformidad (Cu):	6.00
Grado de curvatura (Cc):	1.50

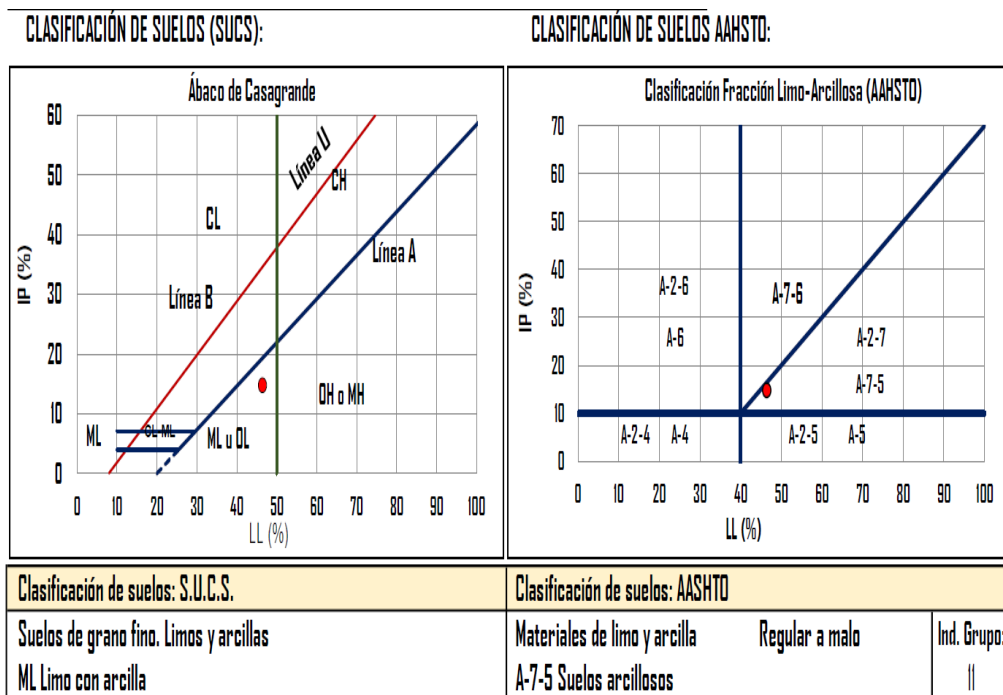
**Figura 59**

Gráfico de la Curva Granulométrica del diámetro de partículas del suelo vs porcentaje que pasa del tamiz C-01.



**Figura 60**

Gráfico de Límite Líquido vs Índice Plástico y clasificación del suelo SUCS y AASHTO C-01.



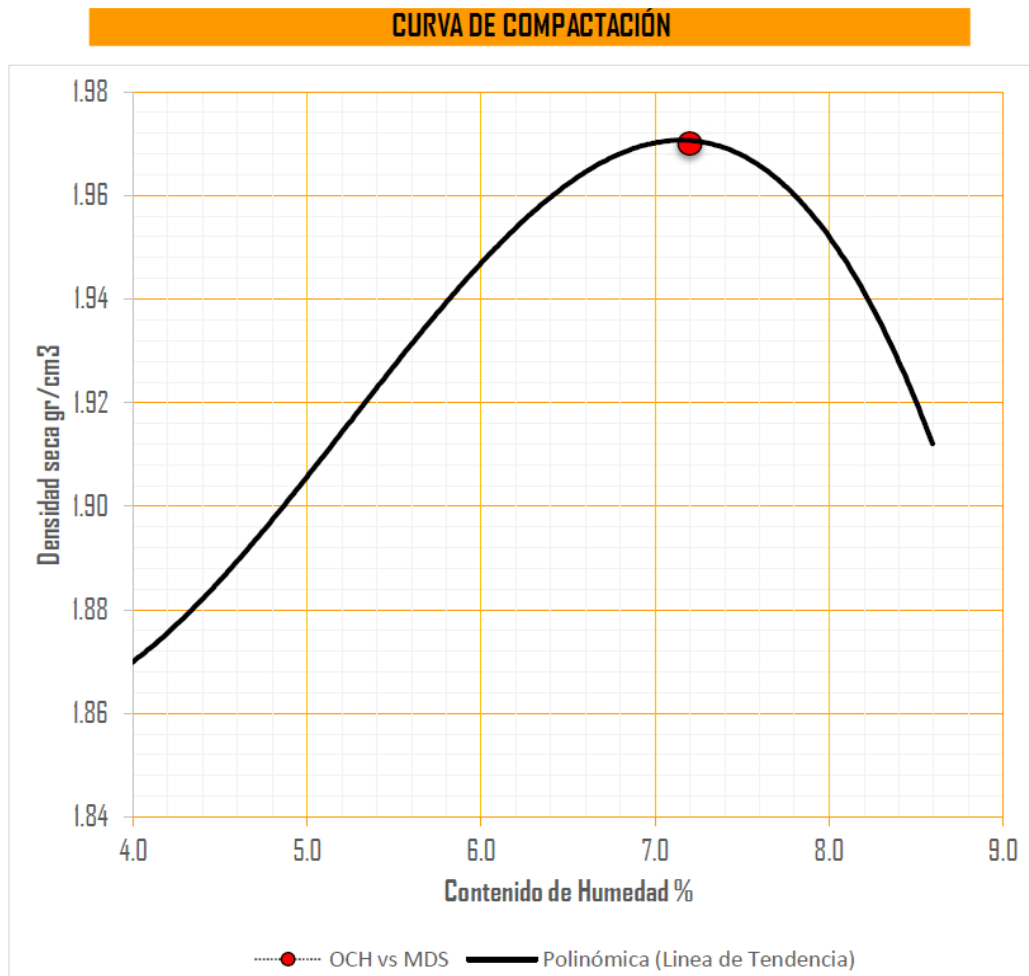
**Tabla 22**

Datos del ensayo: Proctor Modificado C-01, según la normativa ASTM – 1157-91.

PROCTOR MODIFICADO ASTM 1157 - 91					
MOLDE	I	II	III	IV	V
HUMEDAD	2.93	4.95	6.93	8.60	
D.SECA	1.86	1.90	1.97	1.91	
MDS =	1.970 gr/cm <sup>3</sup>			OCH =	7.20 %

**Figura 61**

Gráfico del Óptimo Contenido de Humedad (7.20%) vs Máxima Densidad Seca (1.970 gr/cm<sup>3</sup>) C-01.



- Propiedades Mecánicas:

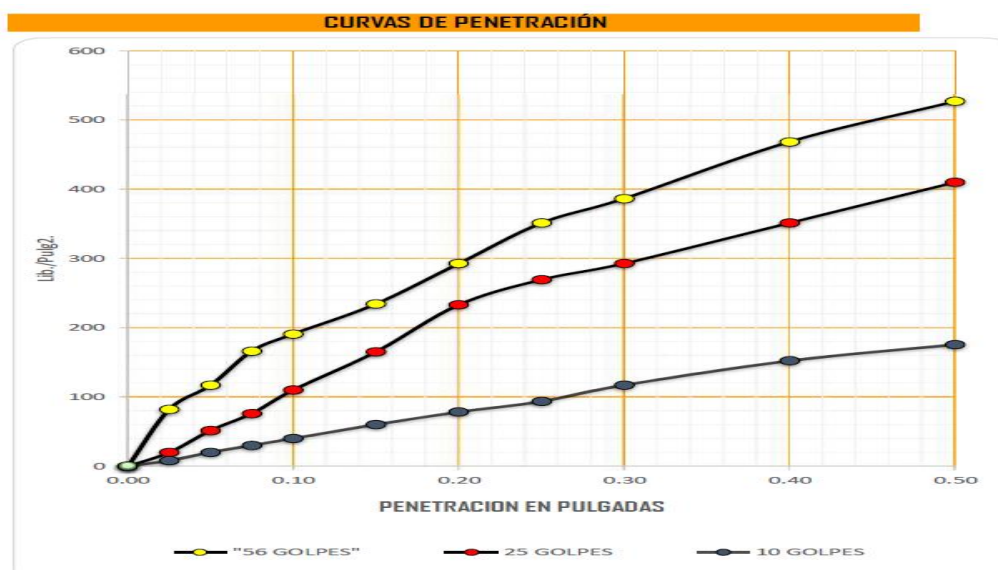
Tabla 23

Datos del ensayo: CBR C-01, según la normativa ASTM D – 1183.

Razón de Soporte California CBR ASTM D 1183			
Compactación de los Moldes			
Molde Nº	I	II	III
Nº de Capas	5	5	5
Nº de Golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.96	1.91	1.89
Contenido de Humedad (%)	7.25	7.28	7.26
CUADRO C.B.R. PARA 0.1" DE PENETRACIÓN			
Molde Nº	I	II	III
Carga Aplicada	191.0	110.1	40.2
Carga Patrón	1000	1000	1000
C.B.R. (%)	19.1	11.0	4.0
Resultados CBR			
Condición de la Muestra	4 días de Saturación		
Sobrecarga	10 libras		
Hinchamiento promedio (%)	0.00		
CBR (95% de la MDS y 0.1" de penetración)			= 11.01
CBR (100 % de la MDS y 0.1" de penetración)			= 19.10

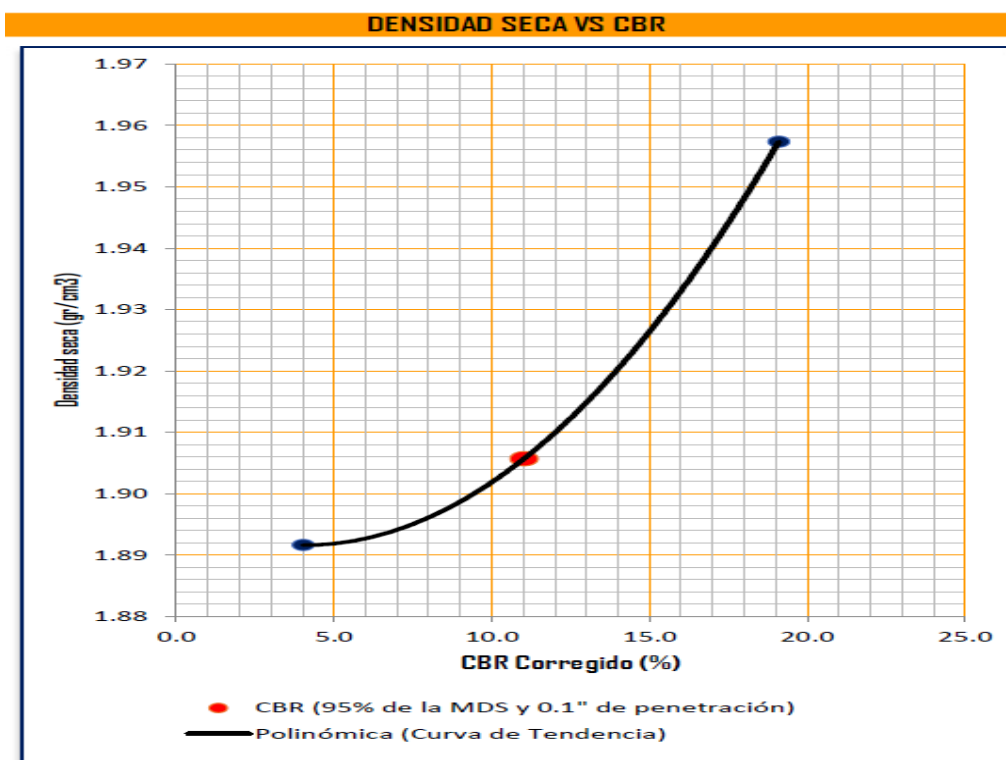
Figura 62

Gráfico de la curva de penetración en pulgadas de 10, 25 y 56 golpes en los moldes para el ensayo CBR C-01.



**Figura 63**

Gráfico de la curva de CBR corregido al 95% vs Máxima Densidad Seca y 0.1" de penetración, en pulgadas C-01.



**Tabla 24**

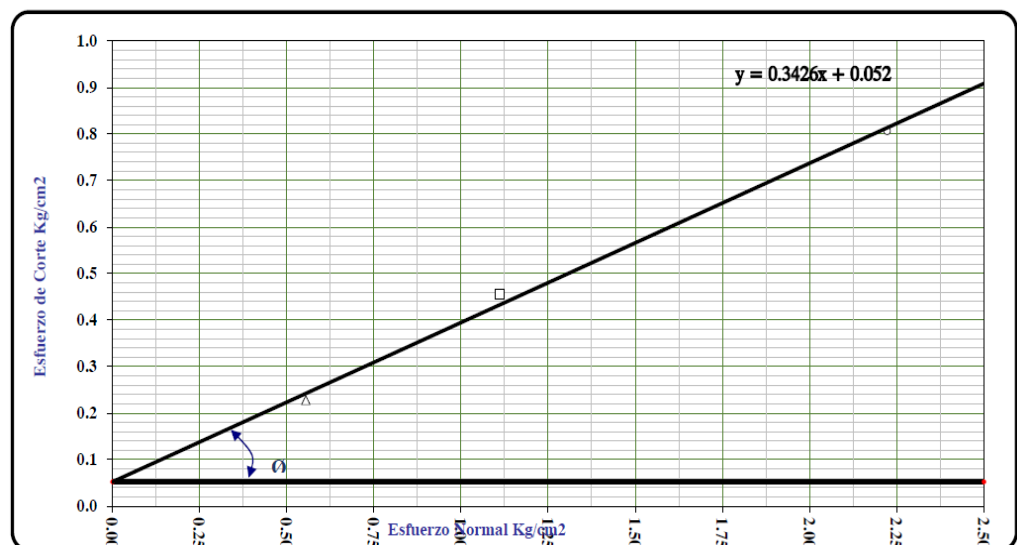
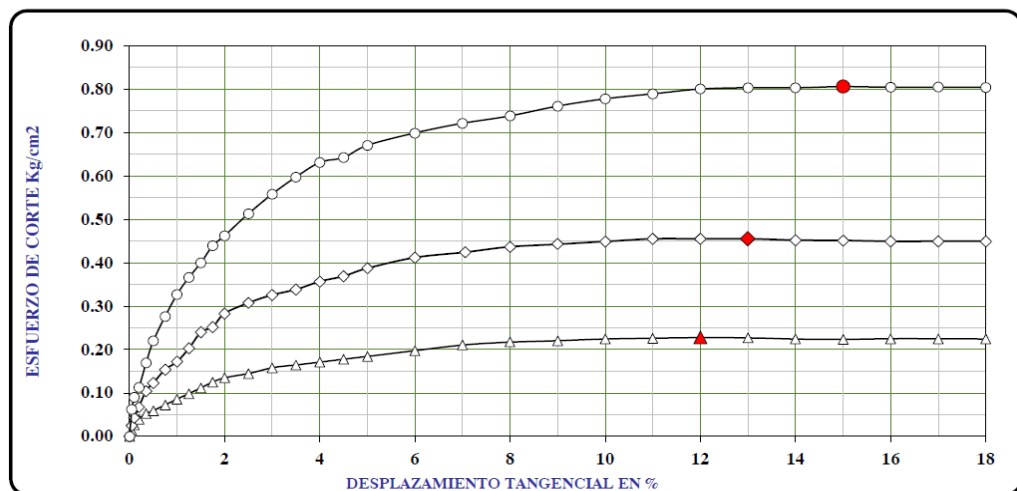
Datos del ensayo: Corte Directo C-01, según la normativa ASTM D – 3080, AASHTO T – 236, deformación tangencial, esfuerzo de corte y esfuerzo normal.

DATOS DEL ESPECIMEN			ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03	
Esfuerzo Normal		Kg/cm2	0.56		1.11		2.22	
Etapa			Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Altura		mm	19.08	17.07	19.05	16.34	19.04	16.03
Lado		mm	60	60	60	60	60	60
Humedad		%	34.2	28.66	34.2	26.35	34.2	23.02
Densidad Seca		g/cm3	1.693	1.893	1.693	1.974	1.693	2.011
ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
Def. Tangencial %	Esf. de Corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esf. Normalizado Kg/cm <sup>2</sup>	Def. Tangencial %	Esf. de Corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esf. Normalizado Kg/cm <sup>2</sup>	Def. Tangencial %	Esf. de Corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esf. Normalizado Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	0.06	0.03
0.1	0.03	0.05	0.1	0.04	0.04	0.1	0.09	0.04
0.2	0.04	0.07	0.2	0.07	0.06	0.2	0.11	0.05
0.35	0.05	0.09	0.35	0.1	0.09	0.35	0.17	0.08
0.5	0.06	0.11	0.5	0.12	0.11	0.5	0.22	0.1
0.75	0.07	0.13	0.75	0.15	0.14	0.75	0.28	0.12
1	0.09	0.15	1	0.17	0.15	1	0.33	0.15
1.25	0.1	0.18	1.25	0.2	0.18	1.25	0.37	0.16
1.5	0.11	0.2	1.5	0.24	0.22	1.5	0.4	0.18
1.75	0.12	0.22	1.75	0.25	0.23	1.75	0.44	0.2
2	0.13	0.24	2	0.28	0.25	2	0.46	0.21
2.5	0.14	0.26	2.5	0.31	0.28	2.5	0.51	0.23
3	0.16	0.28	3	0.33	0.29	3	0.56	0.25

3.5	0.16	0.3	3.5	0.34	0.3	3.5	0.6	0.27
4	0.17	0.31	4	0.36	0.32	4	0.63	0.28
4.5	0.18	0.32	4.5	0.37	0.33	4.5	0.64	0.29
5	0.18	0.33	5	0.39	0.35	5	0.67	0.3
6	0.2	0.36	6	0.41	0.37	6	0.7	0.31
7	0.21	0.38	7.06	0.42	0.38	7	0.72	0.32
8	0.22	0.39	8	0.44	0.39	8	0.74	0.33
9	0.22	0.4	9	0.44	0.4	9	0.76	0.34
10	0.22	0.4	10	0.45	0.4	10	0.78	0.35
11	0.23	0.41	11	0.46	0.41	11	0.79	0.36
12	0.23	0.41	12	0.46	0.41	12	0.8	0.36
13	0.23	0.41	13	0.46	0.41	13	0.8	0.36
14	0.22	0.4	14	0.45	0.41	14	0.8	0.36
15	0.22	0.4	15	0.45	0.41	15	0.81	0.36
16	0.22	0.4	16	0.45	0.4	16	0.8	0.36
17	0.22	0.4	17	0.45	0.4	17	0.8	0.36
18	0.22	0.4	18	0.45	0.4	18	0.8	0.36

**Figura 64**

Gráfico de la curva de Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial en %, y Esfuerzo Normal y Esfuerzo de Corte, con ángulo de fricción interna de  $18.9^\circ$  y Cohesión de  $0.052 \text{ kg/cm}^2$  ó  $5 \text{ KN/m}^2$  C-01.



$\phi = 18.9^\circ$   
 $c = 0.052 \text{ Kg/cm}^2$

**C-02, PROG. 16+940. E: 351337. N: 8830159, COTA: 4,267.00 msnm****- Propiedades Físicas:****Tabla 25***Datos del ensayo: Contenido de humedad de la muestra C-02 según la normativa MTC E 108.*

<b>Ensayo: Contenido de Humedad C-02, MTC E 108</b>					
<b>MUESTRA</b>		<b>M - 1</b>	<b>M - 2</b>	<b>M - 3</b>	<b>M - 4</b>
Peso de la Muestra húmeda + Tara	gr.	208.2	205.3	185.4	198.3
Peso de la Muestra Seca + Tara	gr.	188.8	185.3	167.3	178.6
Peso de la Tara	gr.	37.3	37.7	38.0	38.8
Peso del agua	gr.	19.4	20.0	18.1	19.7
Peso de las Partículas Solidas	gr.	151.5	147.6	129.3	139.8
Contenido de Humedad	%	12.8	13.6	14.0	14.1
<b>Contenido de Humedad del Suelo, (%) =</b>		<b>13.61 %</b>			

**Tabla 26***Datos del ensayo: Peso Específico C-02, según la normativa ASTM D - 854-02.*

<b>Ensayo: Peso Específico C-02, ASTM D - 854-02</b>					
<b>MUESTRA</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Peso de la muestra + matraz</b>	<b>gr.</b>	188.00	178.00	203.00	162.00
<b>Peso de la muestra + agua</b>	<b>gr.</b>	623.00	618.00	629.00	610.50
<b>Peso del matraz</b>	<b>gr.</b>	65.00	65.00	65.00	65.00
<b>Volumen del ensayo</b>	<b>cm3.</b>	500.00	500.00	500.00	500.00
<b>Peso específico del agua</b>	<b>gr/cm3</b>	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>Peso de la muestra</b>	<b>gr.</b>	123.00	113.00	138.00	97.00
<b>Volumen de la muestra</b>	<b>cm3.</b>	65.00	60.00	74.00	51.50
<b>Volumen del agua</b>	<b>cm3.</b>	435.00	440.00	426.00	448.50
<b>Peso específico de la muestra</b>	<b>gr/cm3</b>	1.89	1.88	1.86	1.88
<b>Promedio</b>	<b>gr/cm3</b>	<b>1.88</b>			

**Tabla 27***Datos del ensayo: Límites de Atterberg y Clasificación del Suelo C-02, según la normativa NTP - 339.129.*

<b>LIMITES DE ATTERBERG</b>	
<b>Límite líquido LL</b>	32.11%
<b>Límite plástico LP</b>	22.87%
<b>Ind. de Plasticidad IP</b>	9.24%



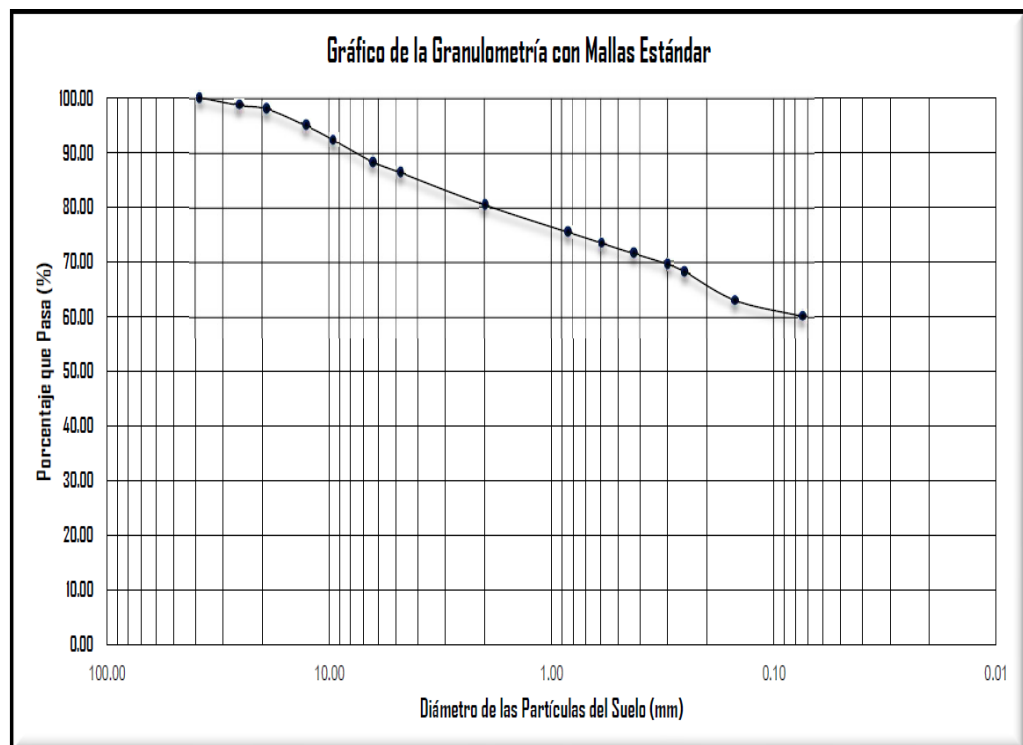
**Tabla 28**

Datos del ensayo: Análisis Granulométrico C-02, según la normativa NTP – 339.128.

GRANULOMETRÍA	
Porcentaje Grava	13.71%
Porcentaje de Arena	26.28%
Porcentaje Limo-Arcilla	60.01%
Material granular equivalente a:	39.99%
Pasa tamiz Nº 4 :	86.291 %
Pasa tamiz Nº 200:	60.014 %
D60(diámetro efectivo):	0.07 mm
D30(diámetro efectivo):	0.04 mm
D10 (diámetro efectivo):	0.01 mm
Coef. de uniformidad (Cu):	6.00
Grado de curvatura (Cc):	1.50

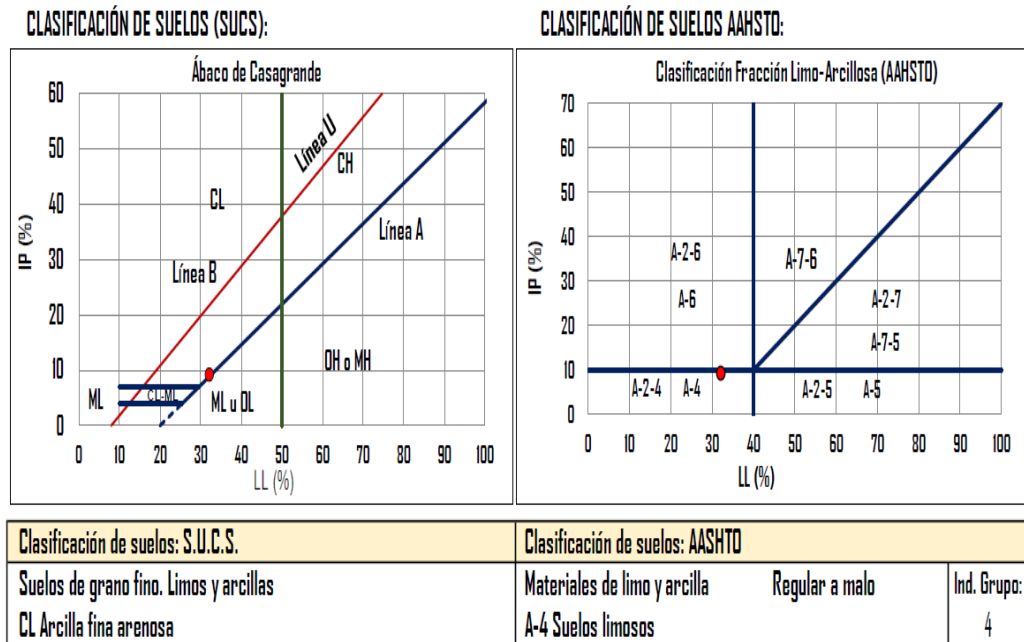
**Figura 65**

Gráfico de la Curva Granulométrica del diámetro de partículas del suelo vs porcentaje que pasa del tamiz C-2.



**Figura 66**

Gráfico de Límite Líquido vs Índice Plástico y clasificación del suelo SUCS y AASHTO C-02.



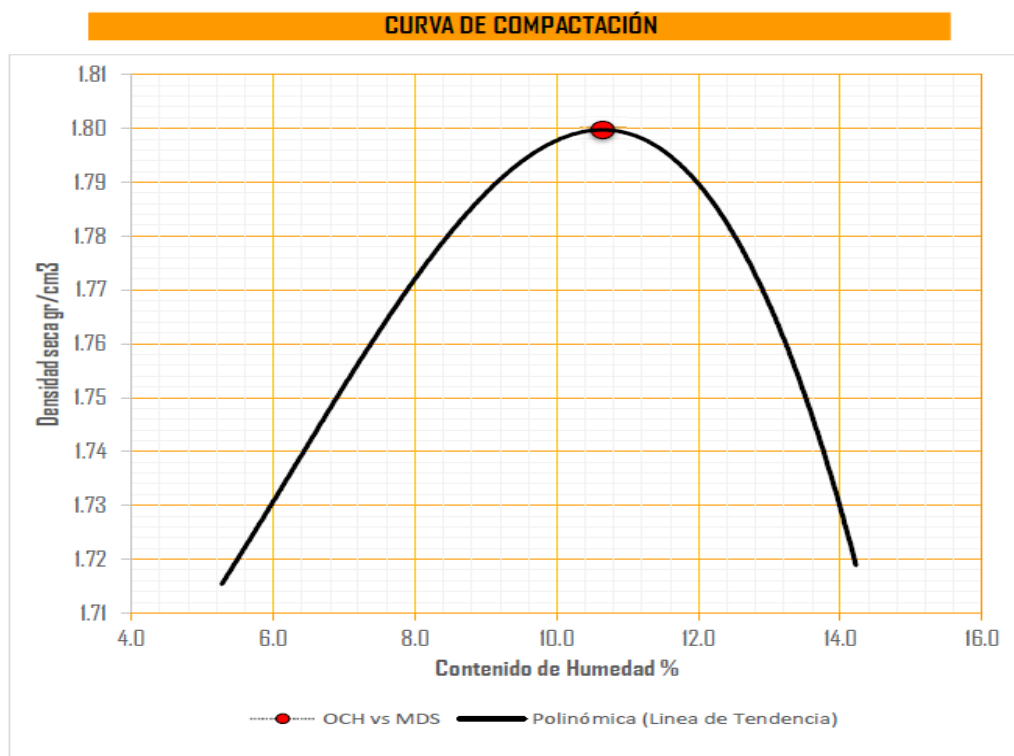
**Tabla 29**

Datos del ensayo: Proctor Modificado C-02, según la normativa ASTM – 1157-91.

PROCTOR MODIFICADO ASTM 1157 - 91					
MOLDE	I	II	III	IV	
HUMEDAD	5.27	8.34	11.53	14.22	
D.SECA	1.72	1.78	1.80	1.72	
MDS =	1.800 gr/cm <sup>3</sup>			DCH =	10.65 %

**Figura 67**

Gráfico del Óptimo Contenido de Humedad (10.65%) vs Máxima Densidad Seca (1.800 gr/cm<sup>3</sup>) C-02.



**- Propiedades Mecánicas:**

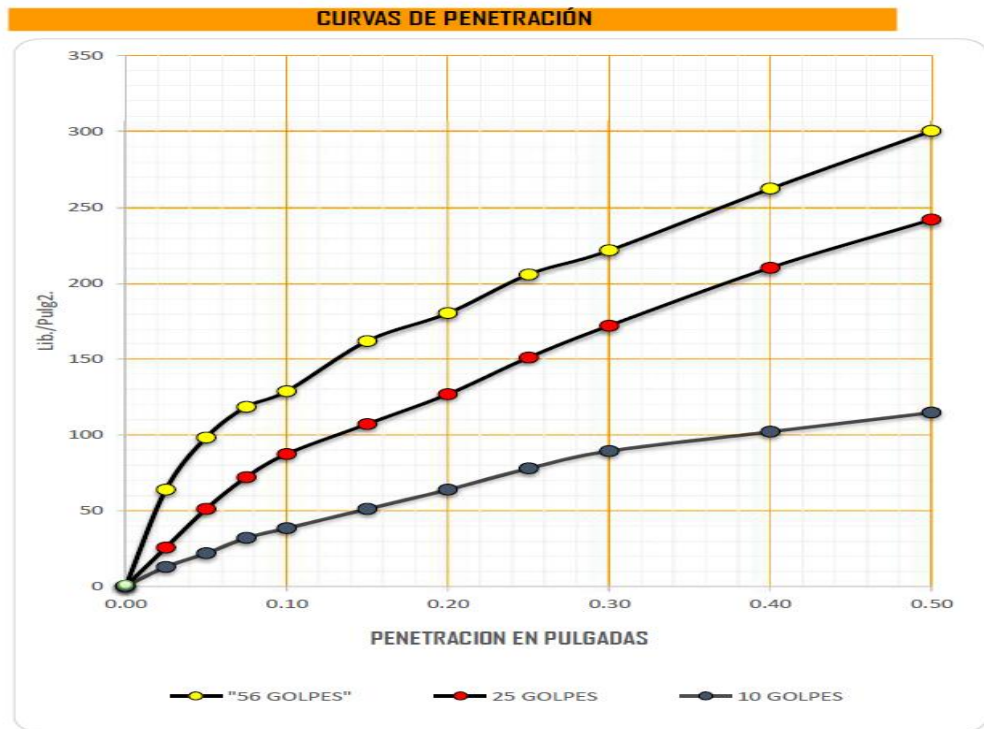
**Tabla 30**

Datos del ensayo: CBR C-02, según la normativa ASTM D – 1183.

<b>Razón de Soporte California CBR ASTM D 1183</b>			
<b>Compactación de los Moldes</b>			
Molde Nº	I	II	III
Nº de Capas	5	5	5
Nº de Golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.82	1.81	1.77
Contenido de Humedad (%)	10.68	10.68	10.65
<b>CUADRO C.B.R. PARA 0.1" DE PENETRACIÓN</b>			
Molde Nº	I	II	III
Carga Aplicada	128.5	87.1	38.2
Carga Patrón	1000	1000	1000
C.B.R. (%)	12.8	8.7	3.8
<b>Resultados CBR</b>			
Condición de la Muestra	4 días de Saturación		
Sobrecarga	10 libras		
Hinchamiento promedio (%)	0.00		
<b>CBR (95% de la MDS y 0.1" de penetración)</b>			<b>= 8.71</b>
<b>CBR (100 % de la MDS y 0.1" de penetración)</b>			<b>= 12.85</b>

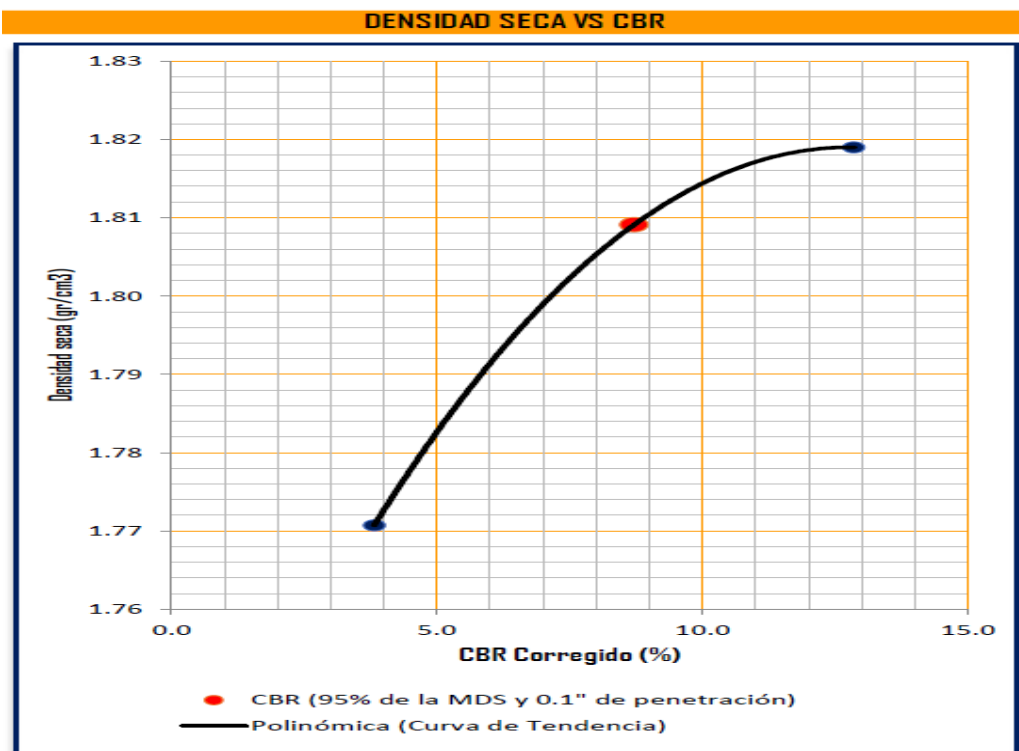
**Figura 68**

Gráfico de la curva de penetración en pulgadas de 10, 25 y 56 golpes en los moldes para el ensayo CBR C-02.



**Figura 69**

Gráfico de la curva de CBR corregido al 95% vs Máxima Densidad Seca y 0.1" de penetración, en pulgadas C-02.



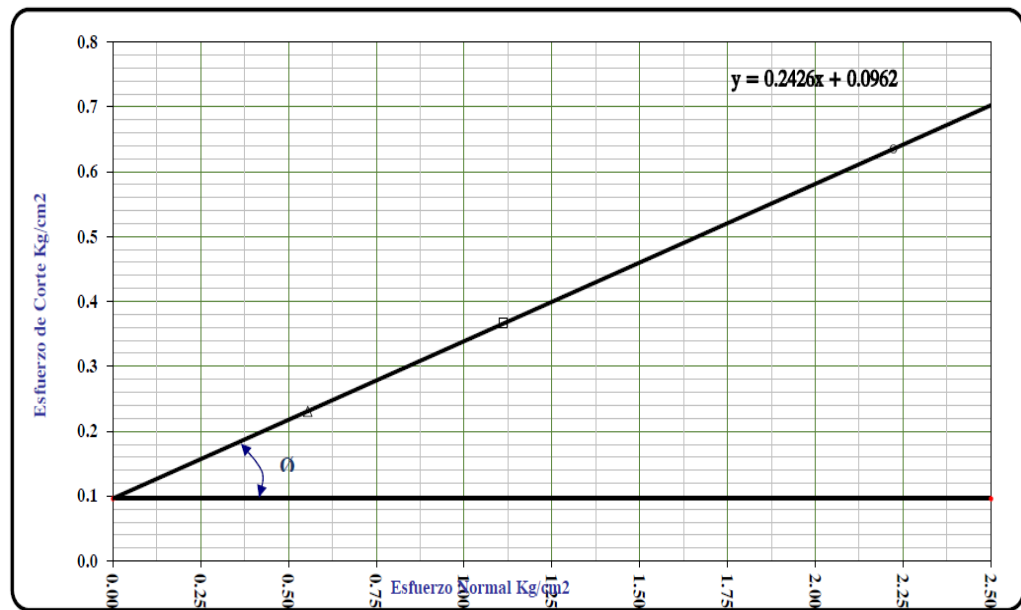
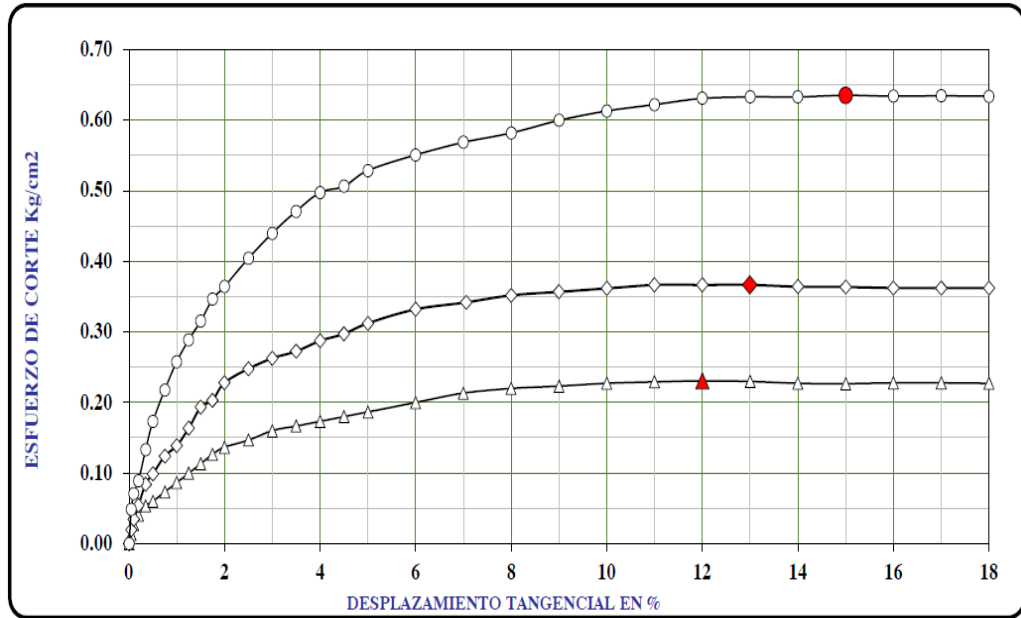
**Tabla 31**

*Datos del ensayo: Corte Directo C-02, según la normativa ASTM D – 3080, AASHTO T – 236, deformación tangencial, esfuerzo de corte y esfuerzo normal.*

DATOS DEL ESPECIMEN		ESPECIMEN 01		ESPECIMEN 02		ESPECIMEN 03		
Esfuerzo Normal	Kg/cm2	0.56		1.11		2.22		
Etapa		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
Altura	mm	19.08	17.07	19.05	16.34	19.04	16.03	
Lado	mm	60	60	60	60	60	60	
Humedad	%	34.2	28.66	34.2	26.35	34.2	23.02	
Densidad Seca	g/cm3	1.693	1.893	1.693	1.974	1.693	2.011	
ESPECIMEN 01			ESPECIMEN 02			ESPECIMEN 03		
Deform. Tangencial %	Esf. de Corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esf. Normalizado Kg/cm <sup>2</sup>	Deform. Tangencial %	Esf. de Corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esf. Normalizado Kg/cm <sup>2</sup>	Deform. Tangencial %	Esf. de Corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esf. Normalizado Kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	0.05	0.02
0.1	0.03	0.05	0.1	0.03	0.03	0.1	0.07	0.03
0.2	0.04	0.07	0.2	0.05	0.05	0.2	0.09	0.04
0.35	0.05	0.1	0.35	0.08	0.08	0.35	0.13	0.06
0.5	0.06	0.11	0.5	0.1	0.09	0.5	0.17	0.08
0.75	0.07	0.13	0.75	0.12	0.11	0.75	0.22	0.1
1	0.09	0.16	1	0.14	0.12	1	0.26	0.12
1.25	0.1	0.18	1.25	0.16	0.15	1.25	0.29	0.13
1.5	0.11	0.2	1.5	0.19	0.17	1.5	0.32	0.14
1.75	0.13	0.23	1.75	0.2	0.18	1.75	0.35	0.16
2	0.14	0.25	2	0.23	0.21	2	0.36	0.16
2.5	0.15	0.26	2.5	0.25	0.22	2.5	0.4	0.18
3	0.16	0.29	3	0.26	0.24	3	0.44	0.2
3.5	0.17	0.3	3.5	0.27	0.25	3.5	0.47	0.21
4	0.17	0.31	4	0.29	0.26	4	0.5	0.22
4.5	0.18	0.32	4.5	0.3	0.27	4.5	0.51	0.23
5	0.19	0.34	5	0.31	0.28	5	0.53	0.24
6	0.2	0.36	6	0.33	0.3	6	0.55	0.25
7	0.21	0.38	7.06	0.34	0.31	7	0.57	0.26
8	0.22	0.4	8	0.35	0.32	8	0.58	0.26
9	0.22	0.4	9	0.36	0.32	9	0.6	0.27
10	0.23	0.41	10	0.36	0.33	10	0.61	0.28
11	0.23	0.41	11	0.37	0.33	11	0.62	0.28
12	0.23	0.41	12	0.37	0.33	12	0.63	0.28
13	0.23	0.41	13	0.37	0.33	13	0.63	0.28
14	0.23	0.41	14	0.36	0.33	14	0.63	0.28
15	0.23	0.41	15	0.36	0.33	15	0.64	0.29
16	0.23	0.41	16	0.36	0.33	16	0.63	0.29
17	0.23	0.41	17	0.36	0.33	17	0.63	0.29
18	0.23	0.41	18	0.36	0.33	18	0.63	0.29

**Figura 70**

Gráfico de la curva de Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial en %, y Esfuerzo Normal y Esfuerzo de Corte, con ángulo de fricción interna de  $13.6^\circ$  y Cohesión de  $0.096 \text{ kg/cm}^2$  ó  $9.4 \text{ KN/m}^2$  C-02.



$\phi = 13.6^\circ$   
 $c = 0.096 \text{ Kg/cm}^2$

### 4.2.3. Análisis de Resultados:

Según los resultados de ensayo en el laboratorio definimos en resumen las propiedades las muestras de la calicata C-01 y C-02, para ello incluiremos como el Coeficiente de Poisson, el Módulo de Elasticidad y el Coeficiente de Permeabilidad del suelo de acuerdo al tipo de suelo:

#### Figura 71

*Parámetros de Módulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson para diferentes tipos de suelo* (Braja, 2015, pág. 523)

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad, $E_s$ (MN/m <sup>2</sup> )	Coeficiente de Poisson, $\mu_s$
Arena suelta	10–25	0.20–0.40
Arena semi-densa	15–30	0.25–0.40
Arena densa	35–55	0.30–0.45
Arena limosa	10–20	0.20–0.40
Arena y grava	70–170	0.15–0.35
Arcilla blanda	4–20	
Arcilla media	20–40	0.20–0.50
Arcilla dura	40–100	

#### Figura 72

*Parámetros de Conductividad Hidráulica o Coeficiente de Permeabilidad del suelo saturado* (Braja, 2015, pág. 122)

Tipo de suelo	$k$ (cm/s)
Grava limpia	100–1
Arena gruesa	1.0–0.01
Arena fina	0.01–0.001
Arcilla limosa	0.001–0.00001
Arcilla	<0.000001

De acuerdo al tipo de suelo según el ensayo de las muestras se ha asignado cada parámetro para evaluar correctamente el comportamiento en la simulación del esfuerzo- deformación de subrasante el cual definimos las propiedades físicas y mecánicas de las dos muestras:

## **Muestra C-01, Subrasante de la Progresiva 09+760:**

**Tabla 32**

*Propiedades físicas de la muestra de suelo C-01.*

<b>Propiedades Físicas: Muestra C-01</b>		
Tipo de Suelo	Limo con Arcilla (ML) (A-7-5 Suelos arcillosos - II)	
Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> ó TN/m <sup>3</sup> )	1.91	
Contenido de Humedad del Suelo (%)	18.09	
Límite líquido LL (%)	46.42	
Límite plástico LP (%)	31.64	
Ind. de Plasticidad IP (%)	14.78	
Coef. de uniformidad (Cu):	6.00	
Grado de curvatura (Cc):	1.50	
Proctor Modificado (OCH gr/cm <sup>3</sup> vs MDS %)	1.97	7.20

**Tabla 33**

*Propiedades mecánicas de la muestra de suelo C-01.*

<b>Propiedades Mecánicas: Muestra C-01</b>		
Módulo de Elasticidad (Es)	30 MN/m <sup>2</sup>	30,000 KN/m <sup>2</sup> (Kpa)
Coeficiente de Poisson (v')	0.200	
Coeficiente de Permeabilidad ( $k$ )	1 m/día	0.00116 cm/seg.
Cohesión (C')	0.052 kg/cm <sup>2</sup>	5.1 KN/m <sup>2</sup> (Kpa)
Ángulo de Fricción	18.9	
CBR (95% de la MDS y 0.1" de Penetración)	11.01	

Una vez definido los parámetros obtenidos mediante ensayo en el laboratorio de la muestra C-01 en la subrasante, añadimos los parámetros de la carpeta asfáltica, base, subbase para poder realizar la simulación de evaluación del comportamiento del esfuerzo-deformación de la subrasante, por lo cual se realizará las conversiones a las unidades que solicita en el programa PLAXIS 2D para ingresar los datos de simulación.



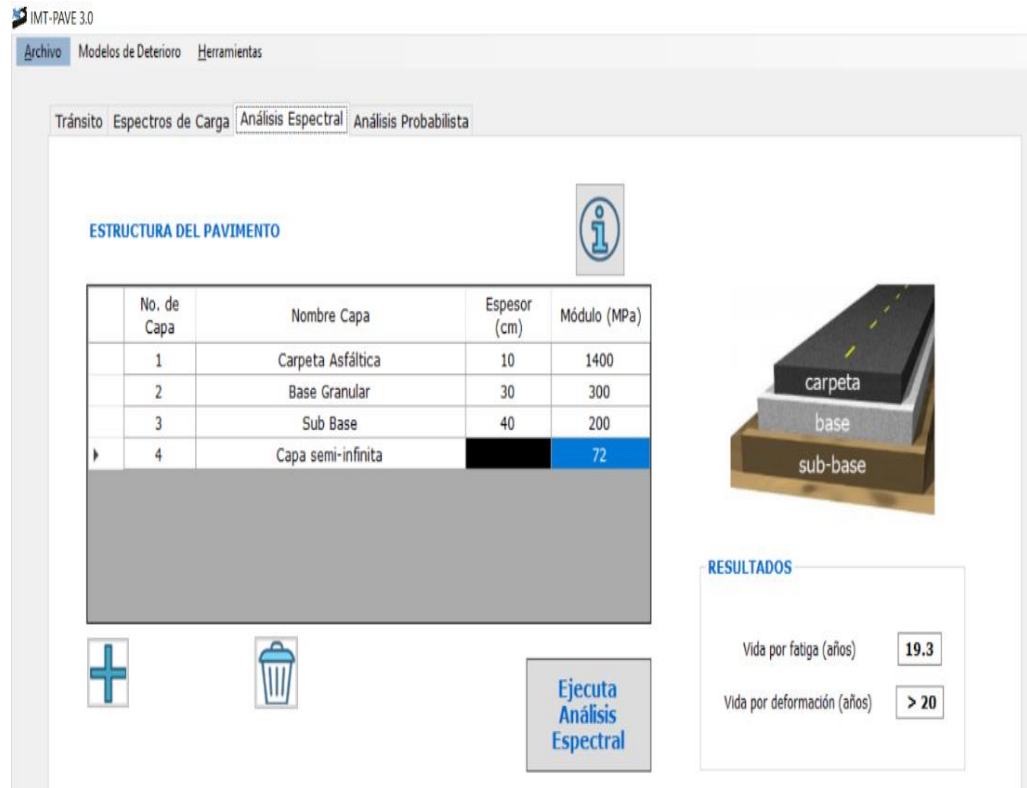
**Tabla 34***Parámetros de entrada para la simulación en el PLAXIS 2D, C-01.*

<b>Parámetros de Entrada de Evaluación de la Subrasante - C-01</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Carpeta Asfáltica</b>	<b>Base</b>	<b>SubBase</b>	<b>Subrasante</b>
<b>Modelo Constitutivo del Material</b>	Modelo	Elástico Lineal	Elástico Lineal	Elástico Lineal	Mohr-Coulomb
<b>Tipo de Comportamiento del Material</b>	Tipo	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado
<b>Peso específico del Suelo no Saturado</b>	KN/m <sup>3</sup>	20.00	20.00	19.00	18.74
<b>Peso específico del Suelo Saturado</b>	KN/m <sup>3</sup>	23.00	24.00	23.00	22.13
<b>Permeabilidad en Dirección Horizontal</b>	m/día	1.00	0.50	0.50	1.00
<b>Permeabilidad en Dirección Vertical</b>	m/día	1.00	0.50	0.50	1.00
<b>Módulo de Young</b>	KN/m <sup>2</sup>	1,400,000.00	300,000.00	200,000.00	72,000.00
<b>Coefficiente Poisson</b>	-	0.35	0.30	0.25	0.20

De acuerdo al diseño del paquete estructural del pavimento flexible en el expediente técnico el cual el proyecto se encuentra ejecutado y operativo, lo realizó mediante el método empírico enfocado a la serviciabilidad de la vía, en base a los parámetros obtenidos tiempo de vida útil de la vía proyectado a 20 años se verificó mediante el software IMT-PAVE su espesor, su módulo de elasticidad y el tiempo de vida que refleja las ante las fallas por fatiga y deformación permanente.

## Figura 73

Tiempo de vida útil del pavimento flexible según el diseño en el expediente técnico enfocado a la Serviciabilidad de la vía, con el software IMT-Pave define la vida útil ante fallas por fatiga y deformación permanente promedio de 20 años.



The screenshot displays the IMT-PAVE 3.0 software interface. The main window is titled "ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO" and contains a table with the following data:

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	10	1400
2	Base Granular	30	300
3	Sub Base	40	200
4	Capa semi-infinita		72

To the right of the table is a 3D diagram of the pavement structure with layers labeled "carpeta", "base", and "sub-base". Below the table are icons for adding (+) and deleting (trash) layers, and a button labeled "Ejecuta Análisis Espectral".

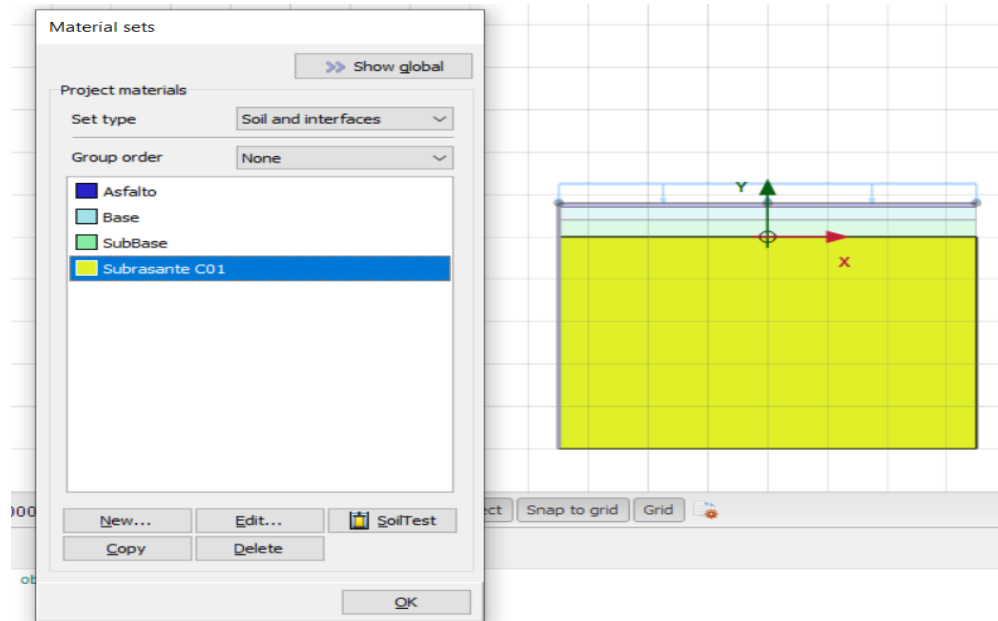
The "RESULTADOS" section shows the following values:

- Vida por fatiga (años): 19.3
- Vida por deformación (años): > 20

Se realiza el diseño del pavimento flexible en el PLAXIS-2D con los resultados obtenidos como parámetros de entrada, generando las mallas y nodos con elementos de forma geométrica triangular de 15 nodos cada una para que la malla generada sea fina y nos proporcione información detallada de cada elemento y nodo, luego elegimos los nodos de análisis para generar nuestra información estadística de los parámetros que deseamos analizar:

**Figura 74**

*Ingreso de parámetros de entrada de cada capa del pavimento flexible en Plaxis-2D, C-01.*



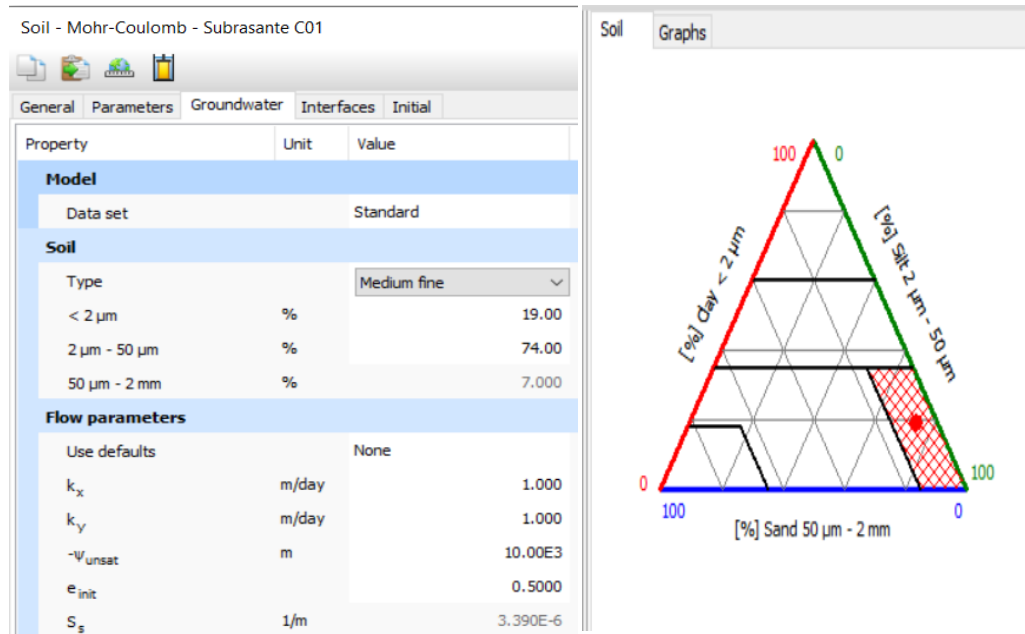
**Figura 75**

*Parámetros de entrada del suelo en Plaxis 2D, peso específico del suelo no saturado y saturado, módulo de elasticidad, Coeficiente de Poisson, Cohesión y ángulo de fricción interna de C-01.*

Soil - Mohr-Coulomb - Subrasante C01			Soil - Mohr-Coulomb - Subrasante C01		
Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
<b>Material set</b>			<b>Stiffness</b>		
Identification		Subrasante C01	E'	kN/m <sup>2</sup>	72.00E3
Material model		Mohr-Coulomb	v' (nu)		0.2000
Drainage type		Drained	<b>Alternatives</b>		
Colour		RGB 223, 240, 40	G	kN/m <sup>2</sup>	30.00E3
Comments			E <sub>oed</sub>	kN/m <sup>2</sup>	80.00E3
<b>General properties</b>			<b>Strength</b>		
Y <sub>unsat</sub>	kN/m <sup>3</sup>	18.74	c' <sub>ref</sub>	kN/m <sup>2</sup>	5.100
Y <sub>sat</sub>	kN/m <sup>3</sup>	22.13	φ' (phi)	°	18.90
			ψ (psi)	°	0.000

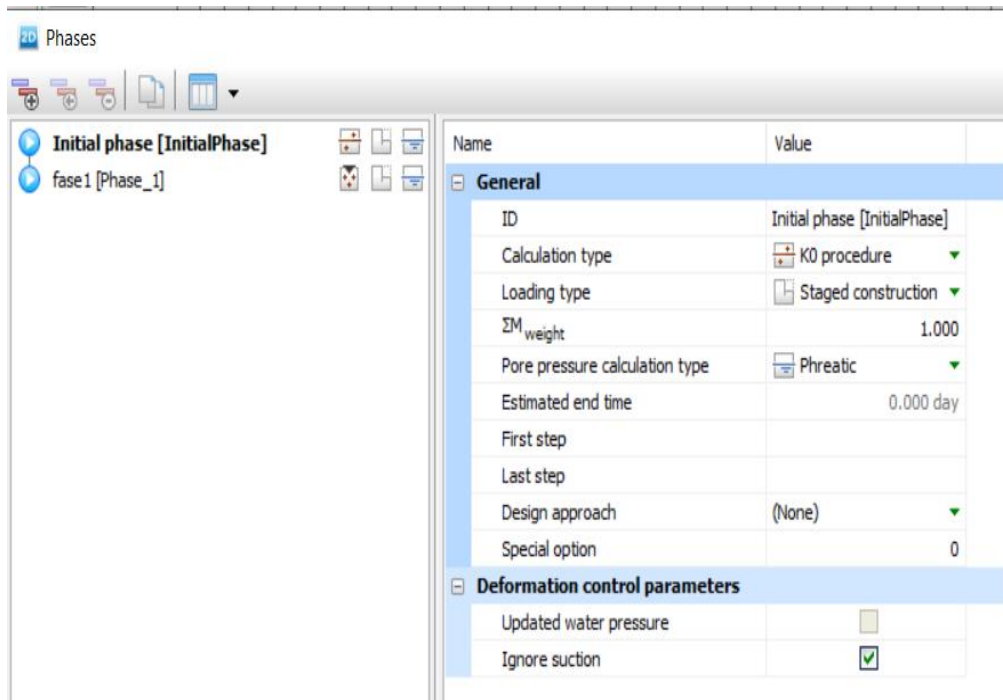
**Figura 76**

Parámetros de entrada del suelo en Plaxis 2D, coeficiente de permeabilidad horizontal y vertical, tipo de suelo de C-01.



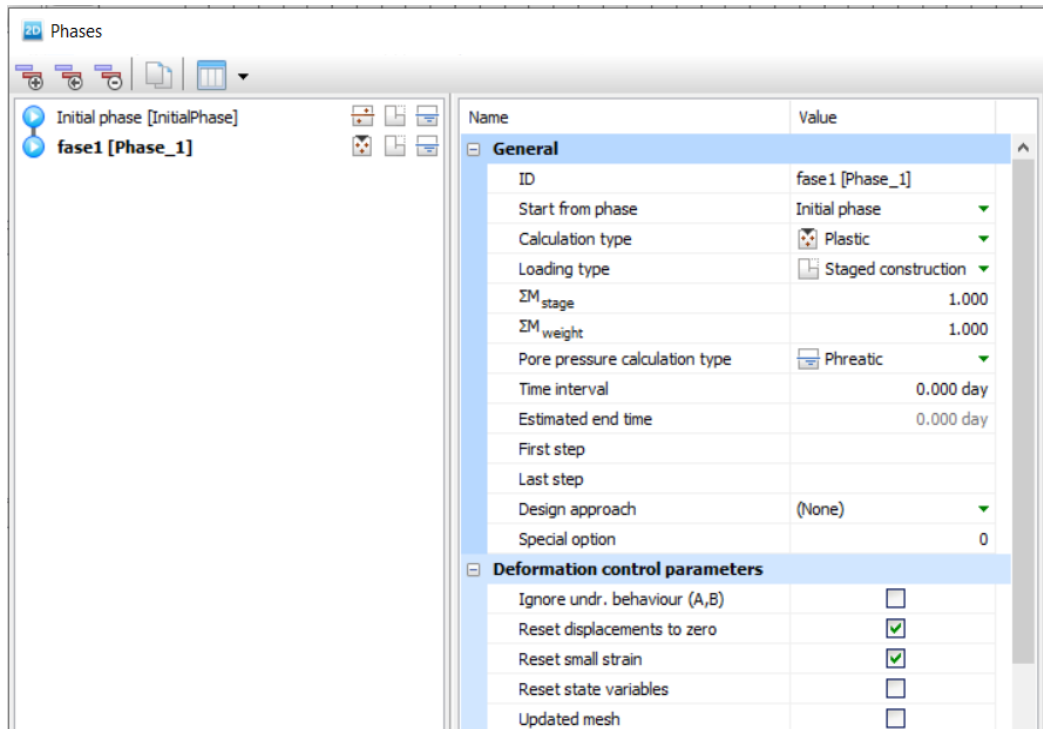
**Figura 77**

Configuración de fase inicial del pavimento flexible, sin considerar las cargas de vehículo con un nivel freático a 2 metros de la subrasante, C-01.



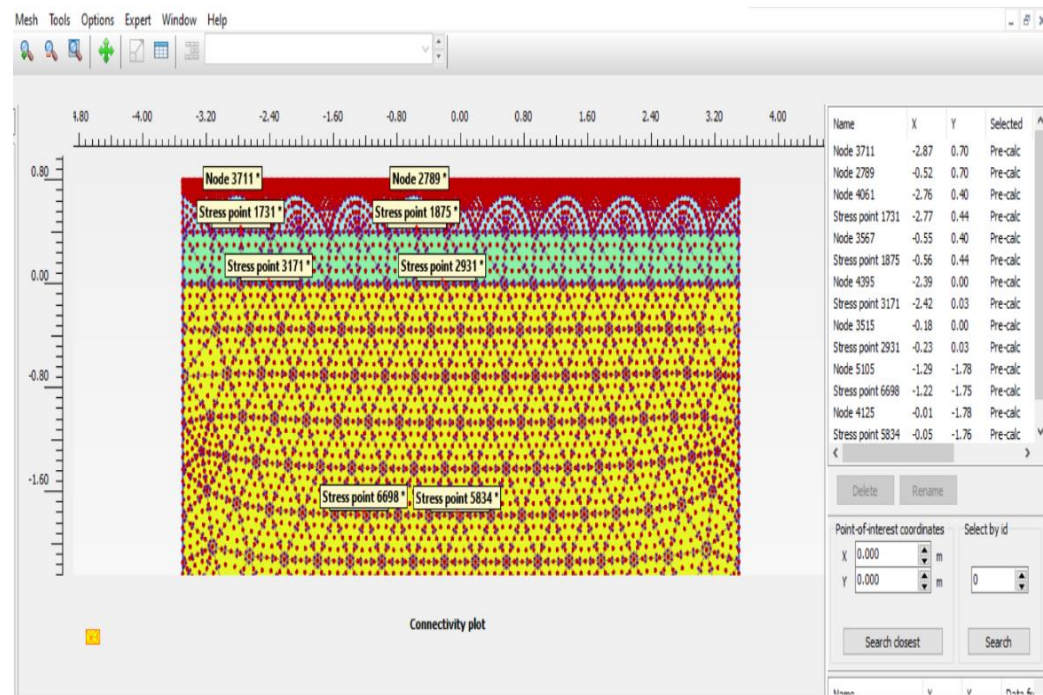
**Figura 78**

Configuración de fase 1 del pavimento flexible para el cálculo hasta un estado plástico que nos permitirá evaluar las deformaciones ante las cargas de los vehículos, C-01.



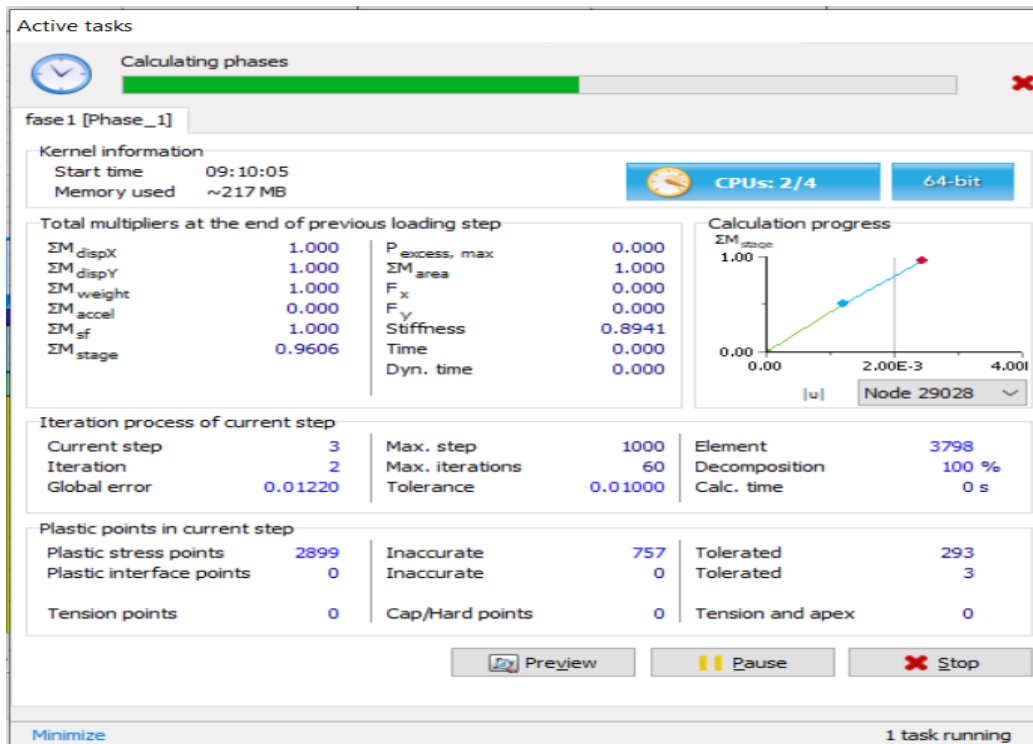
**Figura 79**

Generando las mallas y nodos definimos los puntos de los nodos de análisis, C-01.



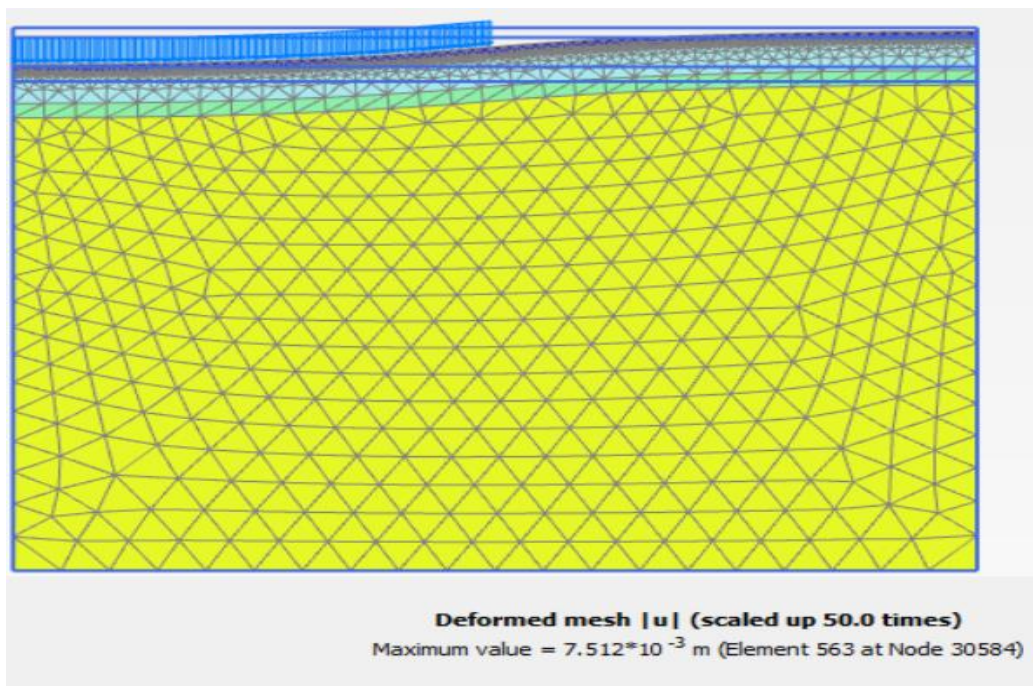
**Figura 80**

Generado las mallas y asignado los nodos, se calcula la fase inicial del modelo y la fase plástica de la simulación del pavimento flexible, C-01.



**Figura 81**

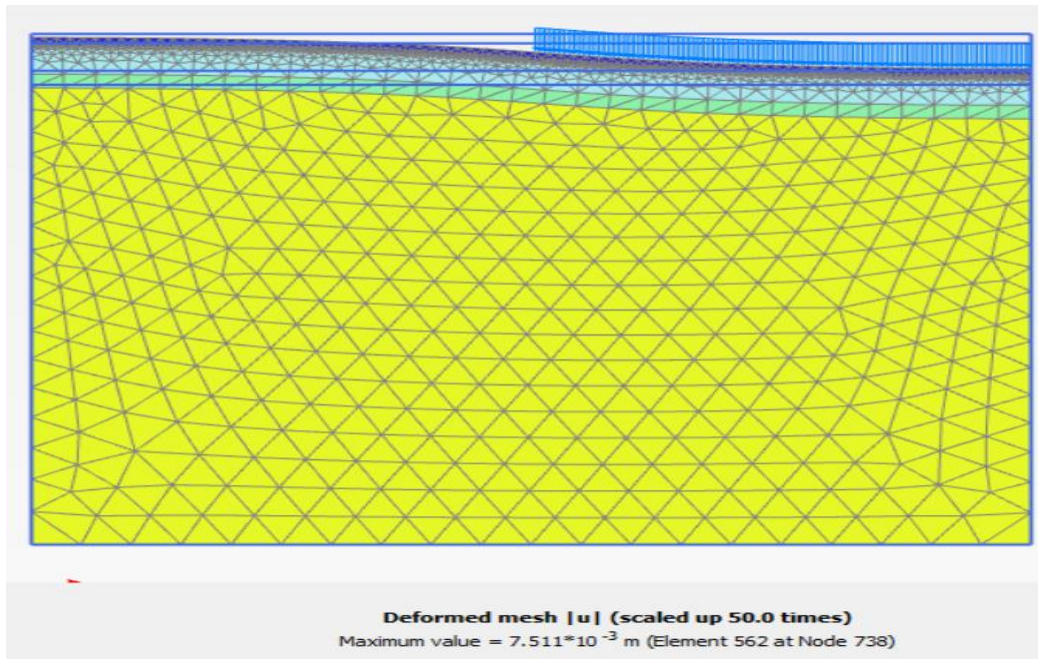
Muestra la deformación máxima del carril izquierdo del pavimento flexible, de acuerdo a su IMD y ESAL en su análisis plástico con 7.512 mm de deformación permanente de la estructura vial C-01.





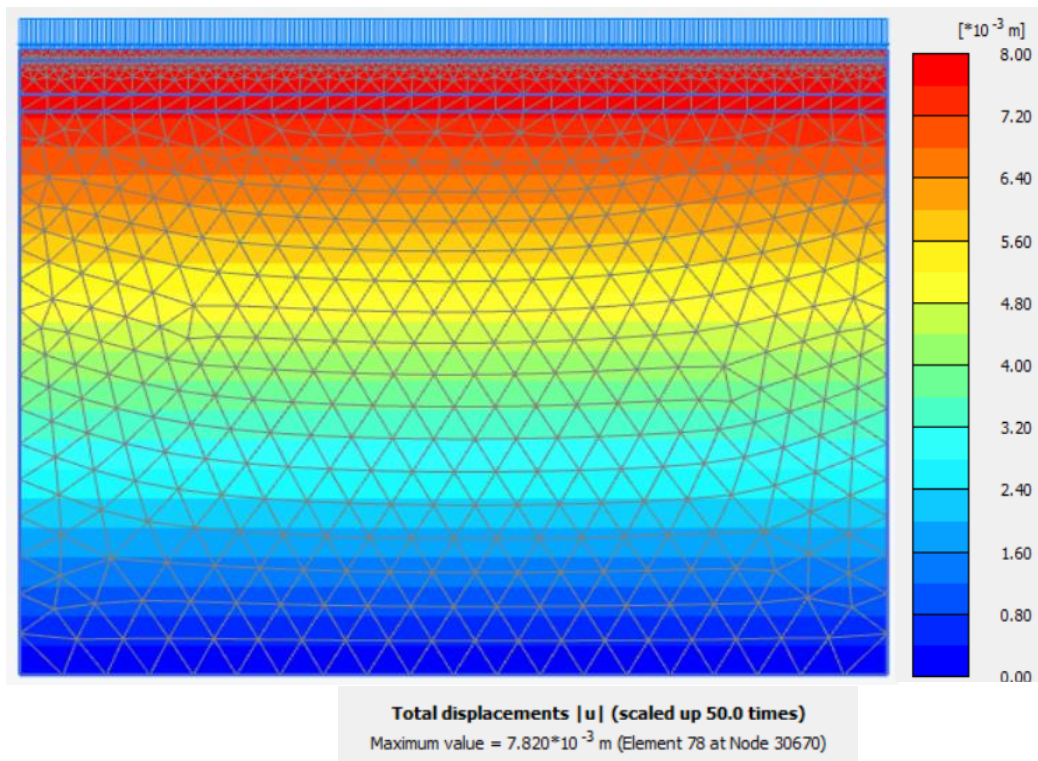
### Figura 82

Muestra la deformación máxima del carril derecho del pavimento flexible, de acuerdo a su IMD y ESAL en su análisis plástico con 7.511 mm de deformación permanente de la estructura vial C-01.



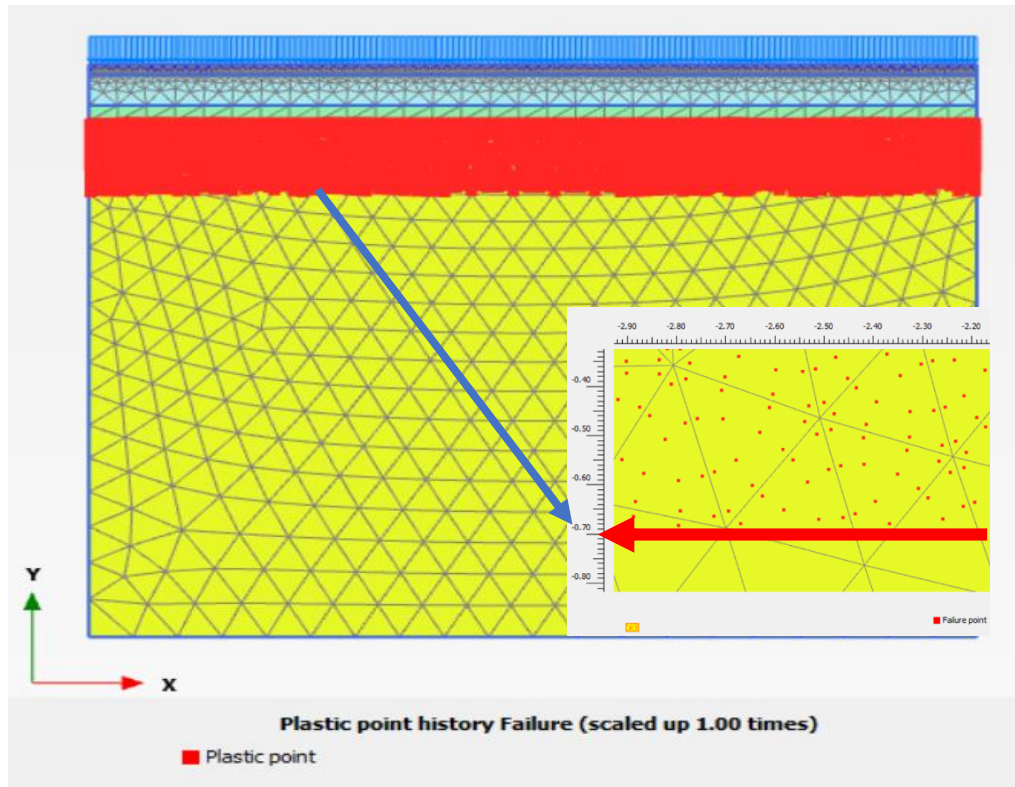
### Figura 83

Muestra la deformación máxima de ambos carriles del pavimento flexible, con 7.820 mm de deformación permanente, en el análisis hasta su estado plástico de la subrasante, C-01.



## Figura 84

Muestra la deformación máxima de ambos carriles del pavimento flexible, con 7.820 mm de deformación permanente, en el análisis hasta su estado plástico, en su punto de falla hasta una profundidad de 070m de la subrasante, C-01.

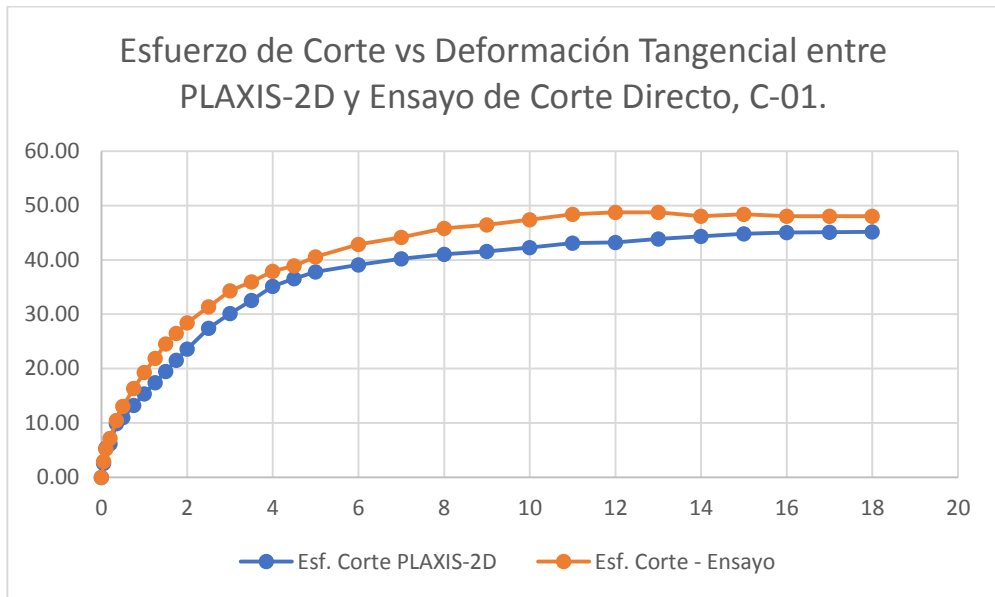


Se identifica en los resultados del PLAXIS-2D el desplazamiento de cada carril promedio de 7.7 mm y en ambos carriles 7.8mm en su estado plástico, donde en el punto de falla de la subrasante falla llega hasta 0.70m de profundidad según la Figura 81, a continuación, se detalla los resultados obtenidos mediante cuadros estadísticos y tablas con los parámetros de salida para el análisis de los resultados de la subrasante de la muestra C-01, Progresiva 09+760.



**Figura 85**

*Comparativo del Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial del PLAXIS 2D y del ensayo en laboratorio, C-01.*



**Tabla 35**

*Comparativo del Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial del PLAXIS 2D y del ensayo en laboratorio, C-01.*

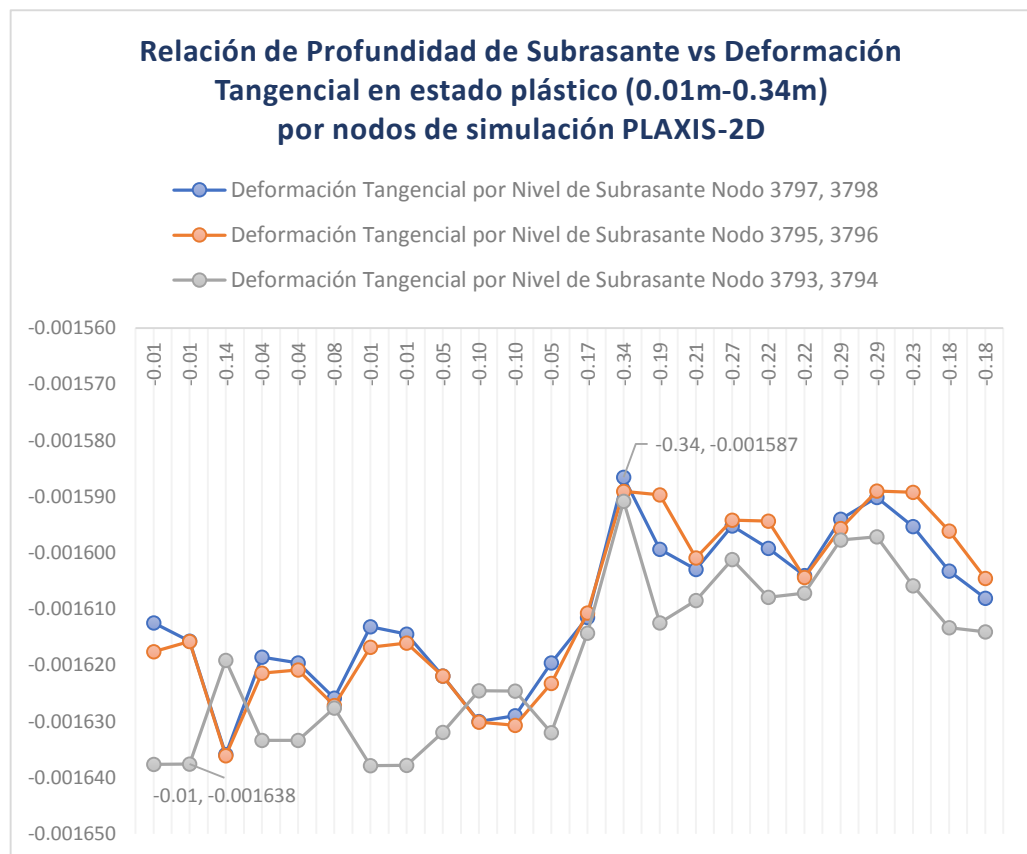
Comparación del Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial de Simulación y Laboratorio - C-01				
N°	Def. Tangencial	Esf. Corte PLAXIS-2D	Esf. Corte Ensayo C-01	% Diferencia del Esfuerzo de Corte
1	0.00	0.00	0.00	0%
2	0.05	2.56	2.94	13%
3	0.10	5.36	5.23	-2%
4	0.20	6.16	7.19	14%
5	0.35	9.88	10.46	6%
6	0.50	11.00	13.08	16%
7	0.75	13.26	16.35	19%
8	1.00	15.32	19.29	21%
9	1.25	17.39	21.91	21%
10	1.50	19.45	24.53	21%
11	1.75	21.52	26.49	19%
12	2.00	23.58	28.45	17%
13	2.50	27.45	31.39	13%
14	3.00	30.12	34.34	12%
15	3.50	32.56	35.97	9%
16	4.00	35.16	37.93	7%
17	4.50	36.56	38.91	6%
18	5.00	37.82	40.55	7%
19	6.00	39.10	42.84	9%
20	7.00	40.23	44.15	9%
21	8.00	41.02	45.78	10%

22	9.00	41.56	46.43	10%
23	10.00	42.25	47.42	11%
24	11.00	43.12	48.40	11%
25	12.00	43.23	48.72	11%
26	13.00	43.85	48.72	10%
27	14.00	44.34	48.07	8%
28	15.00	44.83	48.40	7%
29	16.00	45.01	48.07	6%
30	17.00	45.12	48.07	6%
31	18.00	45.15	48.07	6%

Las deformaciones tangenciales y angulares, con los esfuerzos de corte y normal en los nodos generados en la simulación con el software PLAXIS-2D, muestran el comportamiento en el estado plástico en la subrasante en los niveles de profundidad desde el nivel 0m hasta 0.70m de la subrasante donde indica de color rojo en la figura N° 81 el cual se detalla las deformaciones y posteriormente los desplazamientos del suelo C-01.

**Figura 86**

*Profundidad de la Subrasante vs Deformación tangencial en su estado plástico, donde se observa como máxima deformación de 0.01 m a -0.34m de profundidad C-01.*



**Tabla 36**

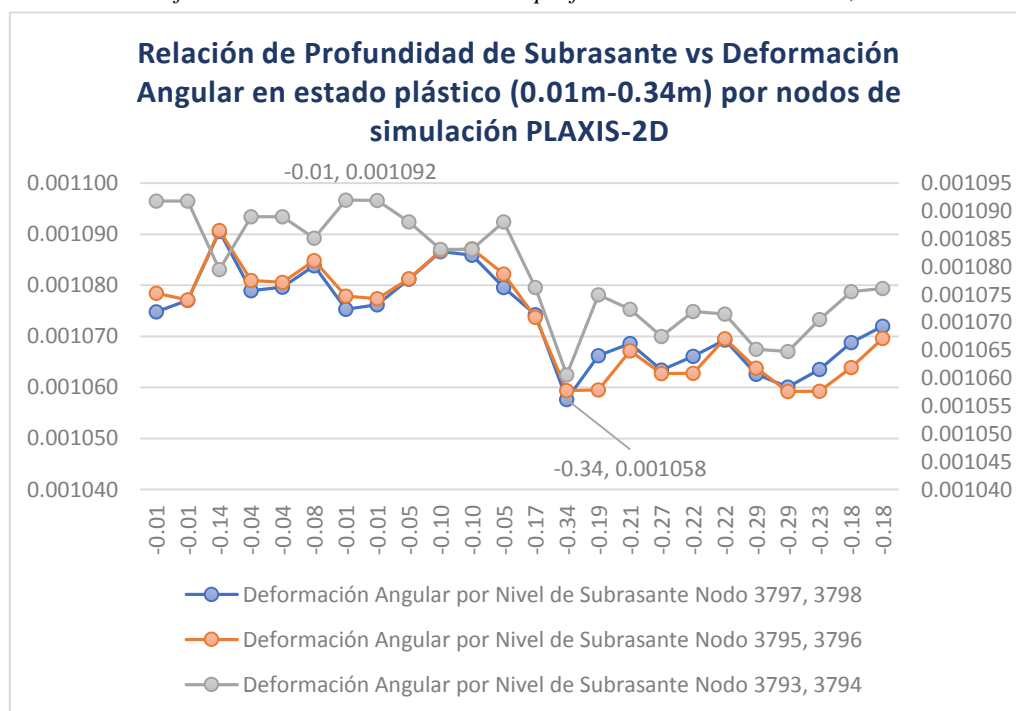
*Comportamiento de la subrasante, deformación tangencial según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.01m a 0.34m por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-01.*

Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.01m - 0.34m) y su deformación tangencial por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-01.			
N°	Nodo de Subrasante, C-01	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Tangencial
1	Clus. 5 - El. 3793 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.01	-0.001638
2		-0.01	-0.001638
3		-0.14	-0.001619
4		-0.04	-0.001633
5		-0.04	-0.001633
6		-0.08	-0.001628
7		-0.01	-0.001638
8		-0.01	-0.001638
9		-0.05	-0.001632
10		-0.10	-0.001625
11		-0.10	-0.001625
12		-0.05	-0.001632
13	Clus. 5 - El. 3794 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.17	-0.001614
14		<b>-0.34</b>	-0.001591
15		-0.19	-0.001612
16		-0.21	-0.001609
17		-0.27	-0.001601
18		-0.22	-0.001608
19		-0.22	-0.001607
20		-0.29	-0.001598
21		-0.29	-0.001597
22		-0.23	-0.001606
23		-0.18	-0.001613
24		-0.18	-0.001614
25	Clus. 5 - El. 3794 Subrasante C01 Soil\_1\_1	<b>-0.15</b>	-0.001618
26		-0.16	-0.001616
27		-0.02	-0.001636
28		-0.12	-0.001621
29		-0.13	-0.001621
30		-0.08	-0.001627
31		-0.16	-0.001617
32		-0.16	-0.001616
33		-0.12	-0.001622
34		-0.06	-0.001630
35		-0.06	-0.001631
36		-0.11	-0.001623
37	Clus. 5 - El. 3795 Subrasante C01 Soil\_1\_1	<b>-0.20</b>	-0.001611
38		-0.35	-0.001589
39		-0.35	-0.001590
40		-0.27	-0.001601
41		-0.31	-0.001594
42		-0.31	-0.001594
43		-0.24	-0.001604
44		-0.30	-0.001596
45		-0.35	-0.001589

46		-0.35	-0.001589
47		-0.30	-0.001596
48		-0.24	-0.001605
49	Clus. 5 - El. 3796 Subrasante C01 Soil\_1\_1	<b>-0.19</b>	-0.001612
50		-0.16	-0.001616
51		-0.02	-0.001636
52		-0.14	-0.001619
53		-0.14	-0.001620
54		-0.09	-0.001626
55		-0.18	-0.001613
56		-0.17	-0.001614
57		-0.12	-0.001622
58		-0.06	-0.001630
59		-0.07	-0.001629
60	-0.14	-0.001620	
61	Clus. 5 - El. 3797 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.19	-0.001612
62		<b>-0.34</b>	<b>-0.001587</b>
63		-0.28	-0.001599
64		-0.25	-0.001603
65		-0.31	-0.001595
66		-0.28	-0.001599
67		-0.25	-0.001604
68		-0.32	-0.001594
69		-0.34	-0.001590
70		-0.31	-0.001595
71		-0.25	-0.001603
72		-0.22	-0.001608

**Figura 87**

*Profundidad de la Subrasante vs Deformación angular en su estado plástico, donde se observa como máxima deformación de 0.01 m a 0.34 m de profundidad de la subrasante, C-01.*



**Tabla 37**

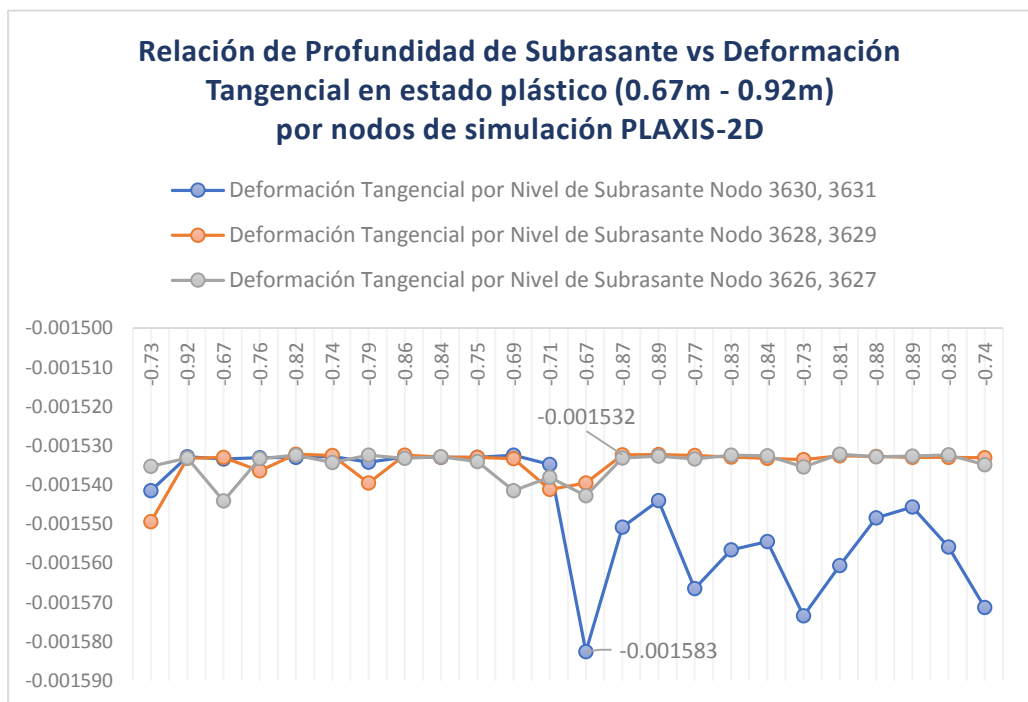
*Comportamiento de la subrasante, deformación angular según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.01 m a 0.34 m de profundidad por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-01.*

Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.01m - 0.34m) y su deformación tangencial por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-01.			
N°	Nodo de Subrasante, C-01	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Angular
1	Clus. 5 - El. 3793 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.01	0.001092
2		-0.01	0.001092
3		-0.14	0.001080
4		-0.04	0.001089
5		-0.04	0.001089
6		-0.08	0.001085
7		-0.01	0.001092
8		-0.01	0.001092
9		-0.05	0.001088
10		-0.10	0.001083
11		-0.10	0.001083
12		-0.05	0.001088
13	Clus. 5 - El. 3794 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.17	0.001076
14		-0.34	0.001061
15		-0.19	0.001075
16		-0.21	0.001072
17		-0.27	0.001067
18		-0.22	0.001072
19		-0.22	0.001072
20		-0.29	0.001065
21		-0.29	0.001065
22		-0.23	0.001071
23		-0.18	0.001076
24		-0.18	0.001076
25	Clus. 5 - El. 3794 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.15	0.001078
26		-0.16	0.001077
27		-0.02	0.001091
28		-0.12	0.001081
29		-0.13	0.001081
30		-0.08	0.001085
31		-0.16	0.001078
32		-0.16	0.001077
33		-0.12	0.001081
34		-0.06	0.001087
35		-0.06	0.001087
36		-0.11	0.001082
37	Clus. 5 - El. 3795 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.20	0.001074
38		-0.35	0.001059
39		-0.35	0.001060
40		-0.27	0.001067
41		-0.31	0.001063
42		-0.31	0.001063
43		-0.24	0.001070
44		-0.30	0.001064

45		-0.35	0.001059
46		-0.35	0.001059
47		-0.30	0.001064
48		-0.24	0.001070
49	Clus. 5 - El. 3796 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.19	0.001075
50		-0.16	0.001077
51		-0.02	0.001091
52		-0.14	0.001079
53		-0.14	0.001080
54		-0.09	0.001084
55		-0.18	0.001075
56		-0.17	0.001076
57		-0.12	0.001081
58		-0.06	0.001087
59		-0.07	0.001086
60	-0.14	0.001080	
61	Clus. 5 - El. 3797 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.19	0.001074
62		<b>-0.34</b>	<b>0.001058</b>
63		-0.28	0.001066
64		-0.25	0.001069
65		-0.31	0.001063
66		-0.28	0.001066
67		-0.25	0.001069
68		-0.32	0.001063
69		-0.34	0.001060
70		-0.31	0.001064
71		-0.25	0.001069
72		-0.22	0.001072

**Figura 88**

*Profundidad de la Subrasante vs Deformación Tangencial en su estado plástico, de 0.67 m a 0.92 m de profundidad de la subrasante C-01.*



**Tabla 38**

*Comportamiento de la subrasante, deformación tangencial según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.67 m a 0.92 m de profundidad por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-01.*

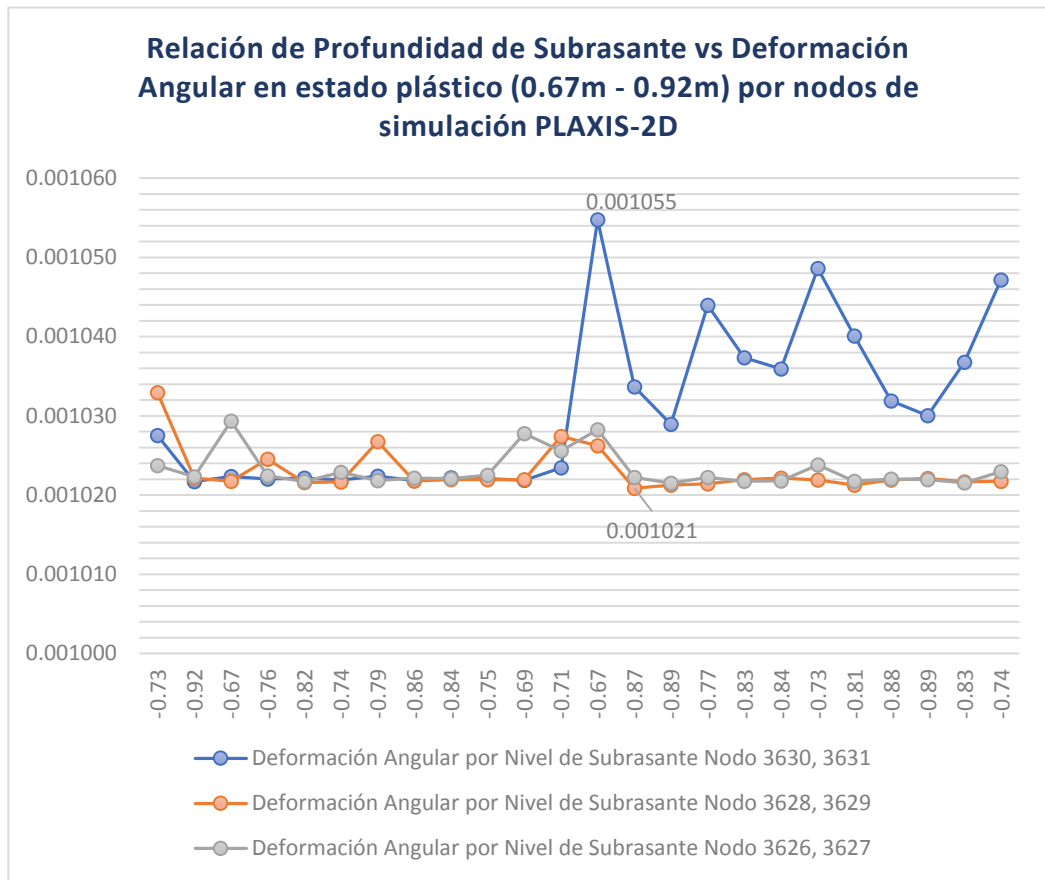
Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.40m - 0.92m) y su deformación tangencial por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-01.			
N°	Nodo de Subrasante, C_01	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Tangencial
1	Clus. 5 - El. 3626 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.73	-0.001535
2		-0.92	-0.001533
3		-0.67	-0.001544
4		-0.76	-0.001533
5		-0.82	-0.001532
6		-0.74	-0.001534
7		-0.79	-0.001532
8		-0.86	-0.001533
9		-0.84	-0.001533
10		-0.75	-0.001534
11		-0.69	-0.001541
12		-0.71	-0.001538
13	Clus. 5 - El. 3627 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.67	-0.001543
14		-0.87	-0.001533
15		-0.89	-0.001533
16		-0.77	-0.001533
17		-0.83	-0.001532
18		-0.84	-0.001533
19		-0.73	-0.001535
20		-0.81	-0.001532
21		-0.88	-0.001533
22		-0.89	-0.001533
23		-0.83	-0.001532
24	-0.74	-0.001535	
25	Clus. 5 - El. 3628 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.63	-0.001549
26		-0.86	-0.001533
27		-0.82	-0.001533
28		-0.73	-0.001536
29		-0.80	-0.001532
30		-0.79	-0.001533
31		-0.70	-0.001539
32		-0.79	-0.001532
33		-0.85	-0.001533
34		-0.83	-0.001533
35		-0.76	-0.001533
36	-0.68	-0.001541	



37	Clus. 5 - El. 3629 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.69	-0.001540
38		-0.90	-0.001532
39		-0.92	-0.001532
40		-0.79	-0.001532
41		-0.86	-0.001533
42		-0.86	-0.001533
43		-0.75	-0.001534
44		-0.83	-0.001533
45		-0.91	-0.001533
46		-0.91	-0.001533
47		-0.85	-0.001533
48		-0.76	-0.001533
49	Clus. 5 - El. 3630 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.68	-0.001542
50		-0.90	-0.001533
51		-0.87	-0.001533
52		-0.78	-0.001533
53		-0.84	-0.001533
54		-0.83	-0.001533
55		-0.75	-0.001534
56		-0.84	-0.001533
57		-0.89	-0.001533
58		-0.88	-0.001533
59		-0.81	-0.001532
60		-0.74	-0.001535
61	Clus. 5 - El. 3631 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.40	-0.001583
62		-0.62	-0.001551
63		-0.66	-0.001544
64		-0.51	-0.001566
65		-0.58	-0.001557
66		-0.59	-0.001555
67		-0.46	-0.001573
68		-0.55	-0.001561
69		-0.63	-0.001548
70		-0.65	-0.001546
71		-0.58	-0.001556
72		-0.47	-0.001571

**Figura 89**

*Profundidad de la Subrasante vs Deformación Angular en su estado plástico, de 0.67 m a 0.92 m de profundidad de la subrasante C-01.*



**Tabla 39**

*Comportamiento de la subrasante, deformación angular según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.67 m a 0.92 m de profundidad por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-01.*

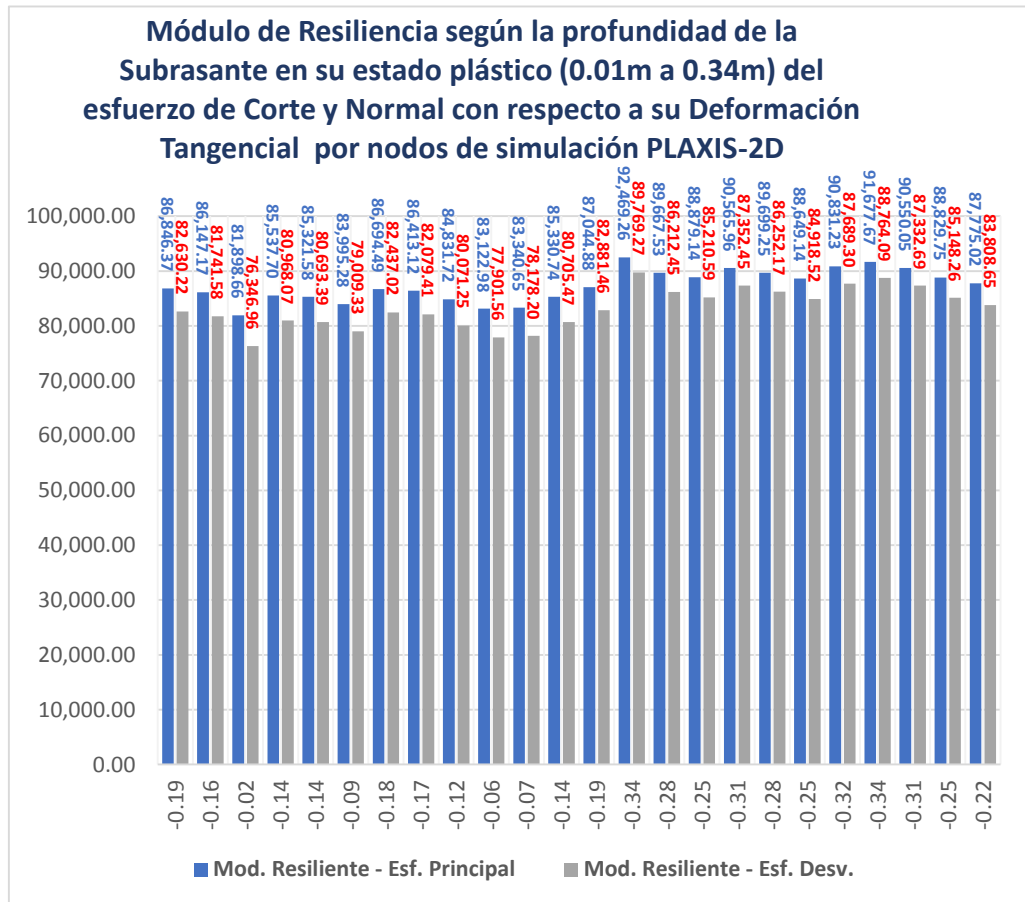
Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.67m - 0.92m) y su deformación angular por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-01.			
N°	Nodo de Subrasante, C_01	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Tangencial
1	Clus. 5 - El. 3626 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.73	0.00102374
2		-0.92	0.00102232
3		-0.67	0.00102935
4		-0.76	0.00102241
5		-0.82	0.00102172
6		-0.74	0.00102289
7		-0.79	0.00102181
8		-0.86	0.00102216
9		-0.84	0.00102206
10		-0.75	0.00102249

11		-0.69	0.00102778
12		-0.71	0.00102560
13	Clus. 5 - El. 3627 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.67	0.00102824
14		-0.87	0.00102225
15		-0.89	0.00102151
16		-0.77	0.00102222
17		-0.83	0.00102174
18		-0.84	0.00102180
19		-0.73	0.00102382
20		-0.81	0.00102176
21		-0.88	0.00102202
22		-0.89	0.00102195
23		-0.83	0.00102156
24		-0.74	0.00102295
25	Clus. 5 - El. 3628 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.63	0.00103295
26		-0.86	0.00102217
27		-0.82	0.00102173
28		-0.73	0.00102452
29		-0.80	0.00102158
30		-0.79	0.00102167
31		-0.70	0.00102674
32		-0.79	0.00102177
33		-0.85	0.00102195
34		-0.83	0.00102194
35		-0.76	0.00102196
36		-0.68	0.00102739
37	Clus. 5 - El. 3629 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.69	0.00102623
38		-0.90	0.00102087
39		-0.92	0.00102126
40		-0.79	0.00102142
41		-0.86	0.00102194
42		-0.86	0.00102215
43		-0.75	0.00102192
44		-0.83	0.00102125
45		-0.91	0.00102190
46		-0.91	0.00102209
47		-0.85	0.00102165
48		-0.76	0.00102174
49	Clus. 5 - El. 3630 Subrasante C01 Soil\1\1	-0.68	0.00102752
50		-0.90	0.00102172
51		-0.87	0.00102236
52		-0.78	0.00102203
53		-0.84	0.00102213
54		-0.83	0.00102192
55		-0.75	0.00102237
56		-0.84	0.00102184

57		-0.89	0.00102220
58		-0.88	0.00102208
59		-0.81	0.00102187
60		-0.74	0.00102343
61	Clus. 5 - El. 3631 Subrasante C01 Soil\_1\_1	-0.40	0.00105478
62		-0.62	0.00103366
63		-0.66	0.00102895
64		-0.51	0.00104396
65		-0.58	0.00103735
66		-0.59	0.00103593
67		-0.46	0.00104862
68		-0.55	0.00104011
69		-0.63	0.00103187
70		-0.65	0.00103003
71		-0.58	0.00103678
72		-0.47	0.00104717

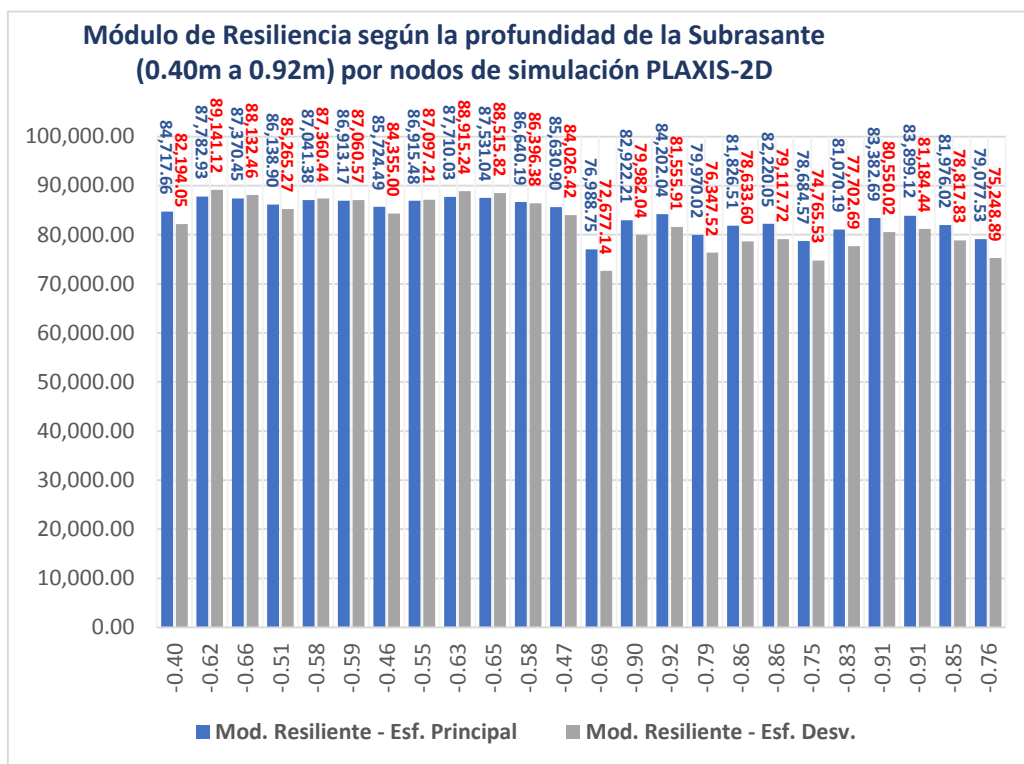
**Figura 90**

Módulo de Resiliencia de la Subrasante, de 0.01m a 0.34m de profundidad, como máximo 92.5Mpa y mínimo 76.3Mpa, C-01.



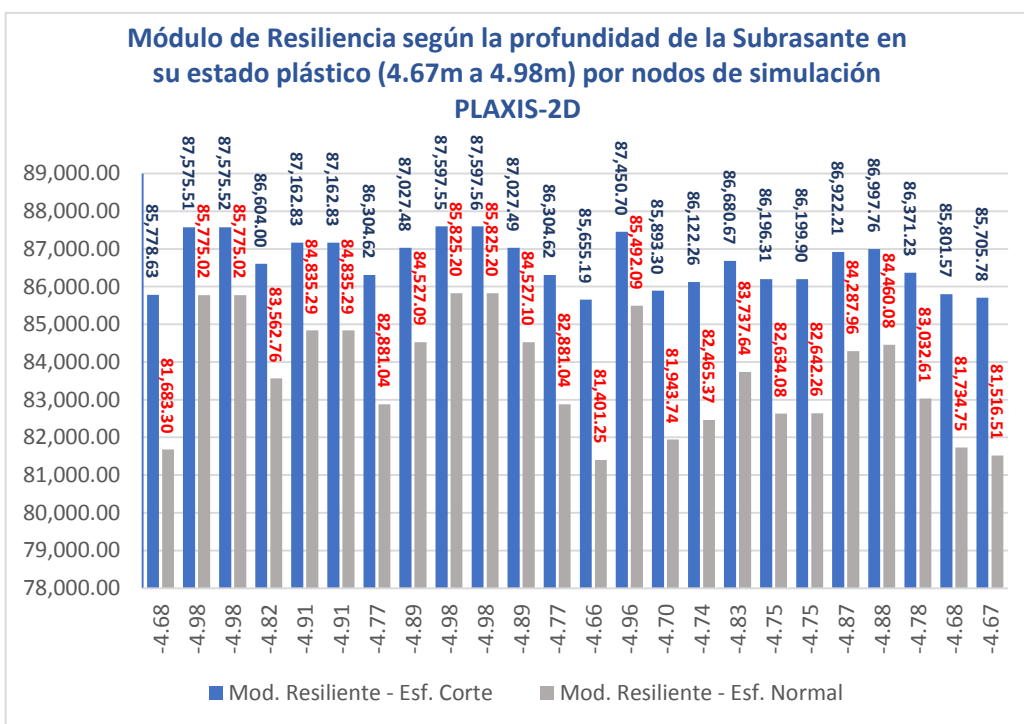
**Figura 91**

Módulo de Resiliencia de la Subrasante, de 0.40m a 0.92m de profundidad, como máximo 89.1Mpa y mínimo 72.7Mpa, C-01.



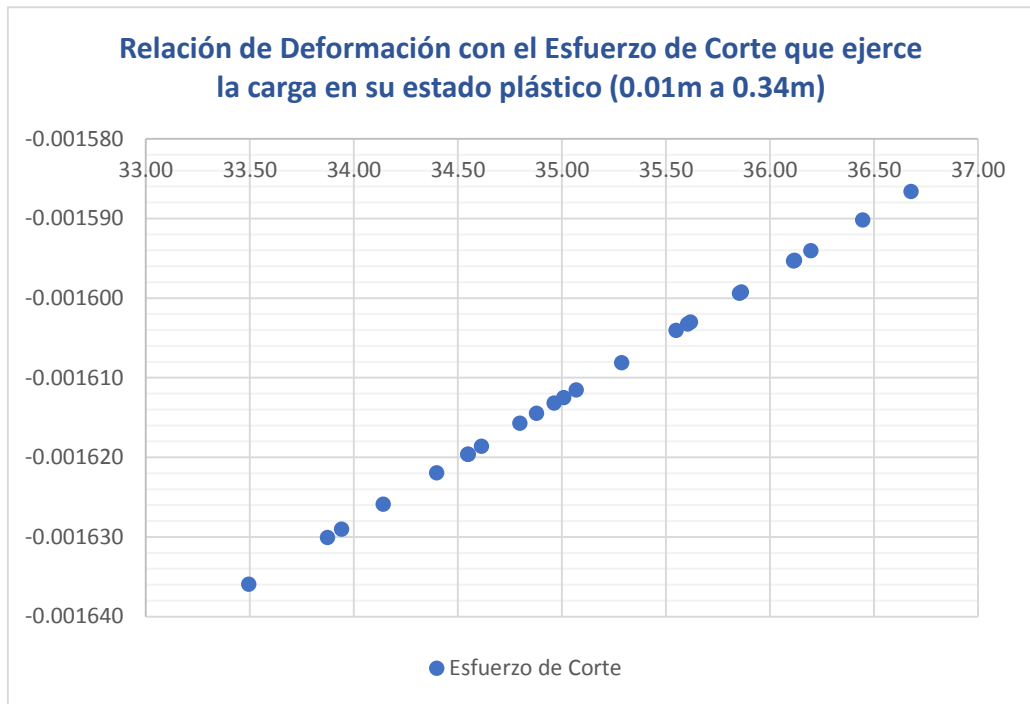
**Figura 92**

Módulo de Resiliencia de la Subrasante, de 4.67m a 4.98m de profundidad respecto a sus esfuerzos de corte y normal, como máximo 87.6Mpa y mínimo 81.4Mpa, C-01.



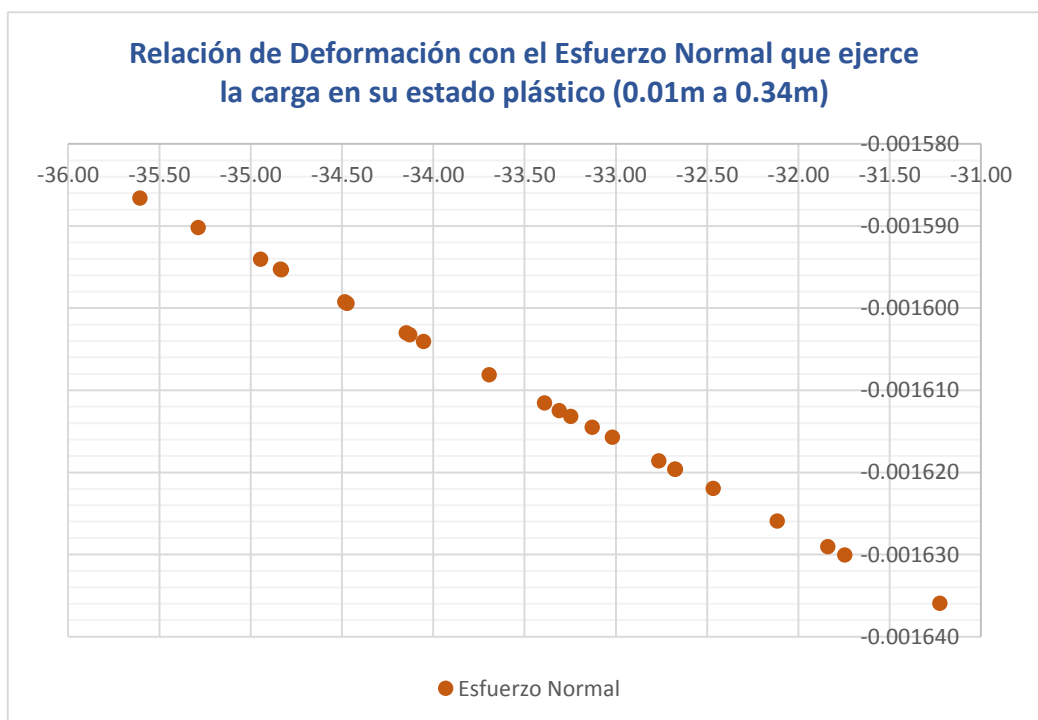
**Figura 93**

*Esfuerzo de Corte vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.01m-0.34m de profundidad de 33.0Kpa a 37.0Kpa, C-01.*



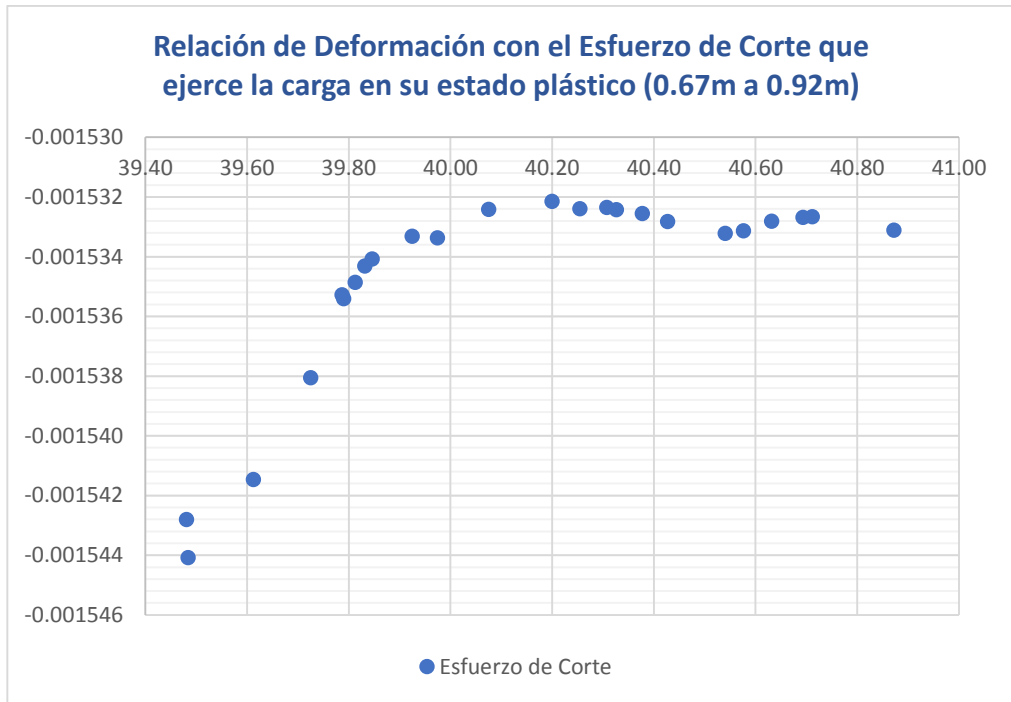
**Figura 94**

*Esfuerzo Normal vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.01m-0.34m de profundidad de -31Kpa a -36.0Kpa, C-01.*



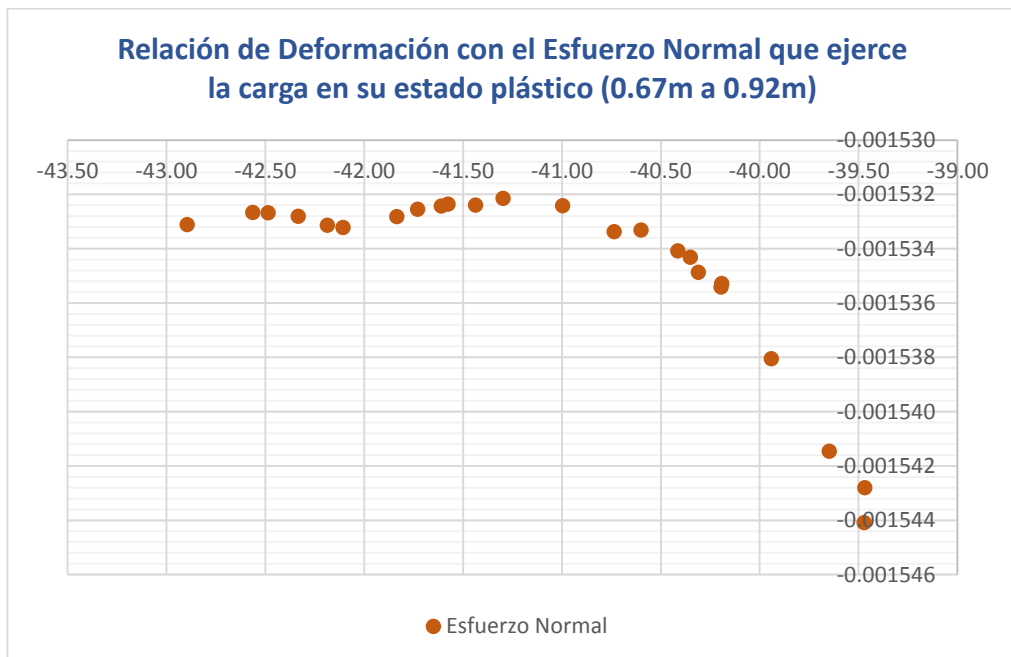
**Figura 95**

*Esfuerzo de Corte vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.67m-0.92m de profundidad de 39.40Kpa a 41Kpa, C-01.*



**Figura 96**

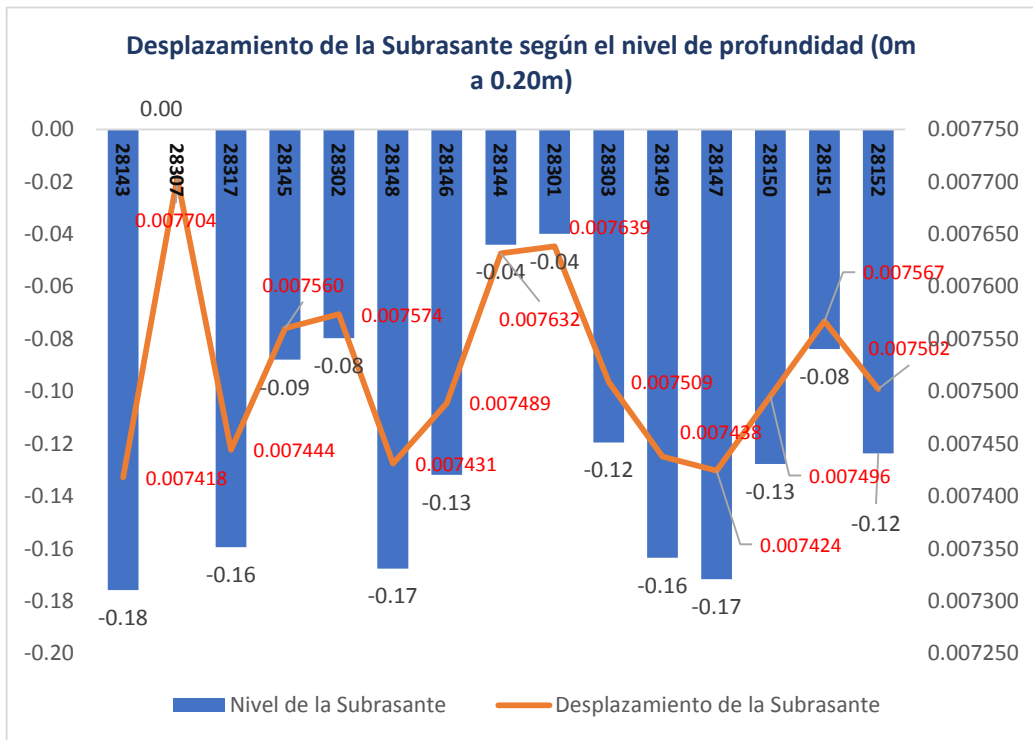
*Esfuerzo Normal vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.67m-0.92m de profundidad de -39Kpa a -43.5Kpa, C-01.*





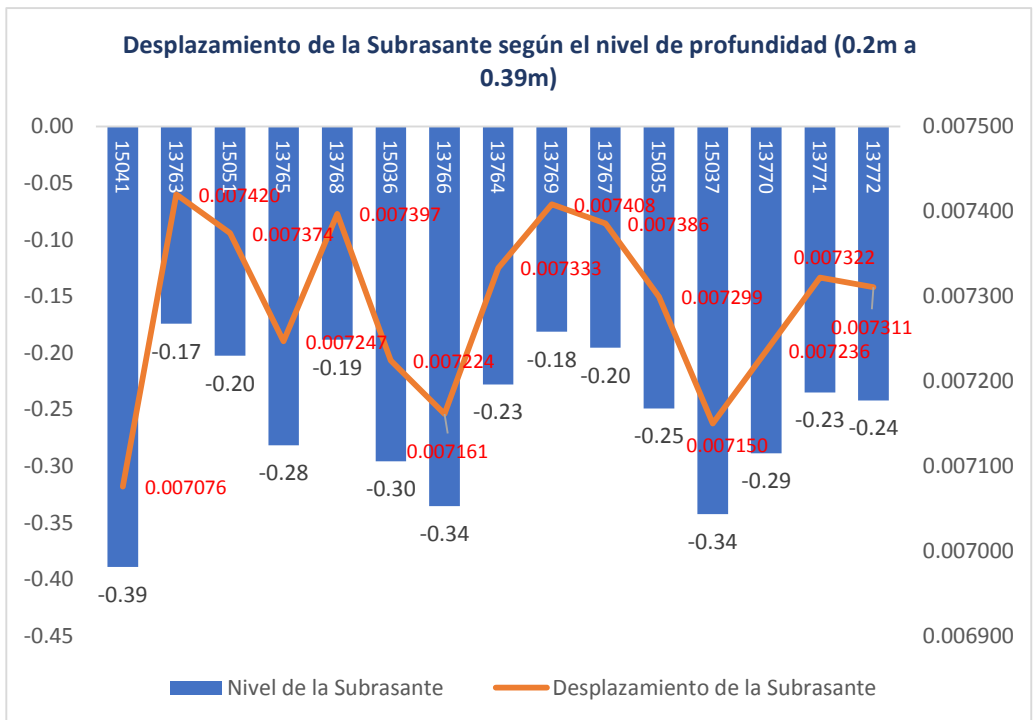
**Figura 97**

Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0m a 0.20m) con un desplazamiento entre 7.41mm - 7.70mm, C-01.



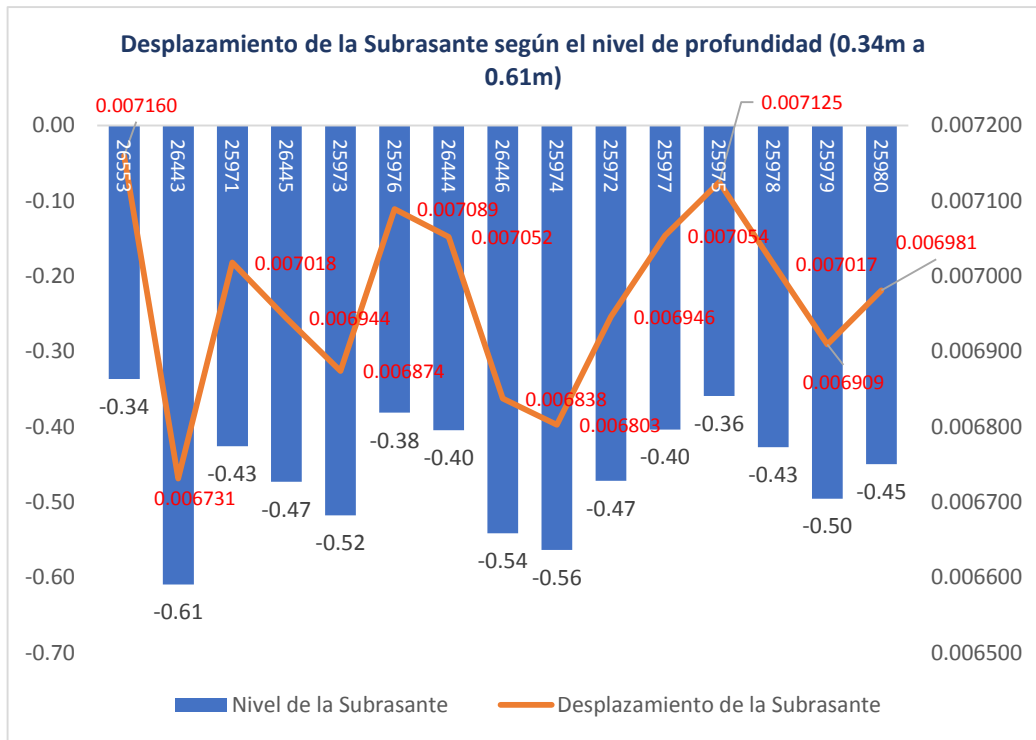
**Figura 98**

Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0.20m a 0.39m) con un desplazamiento entre 7.08mm - 7.42mm, C-01.



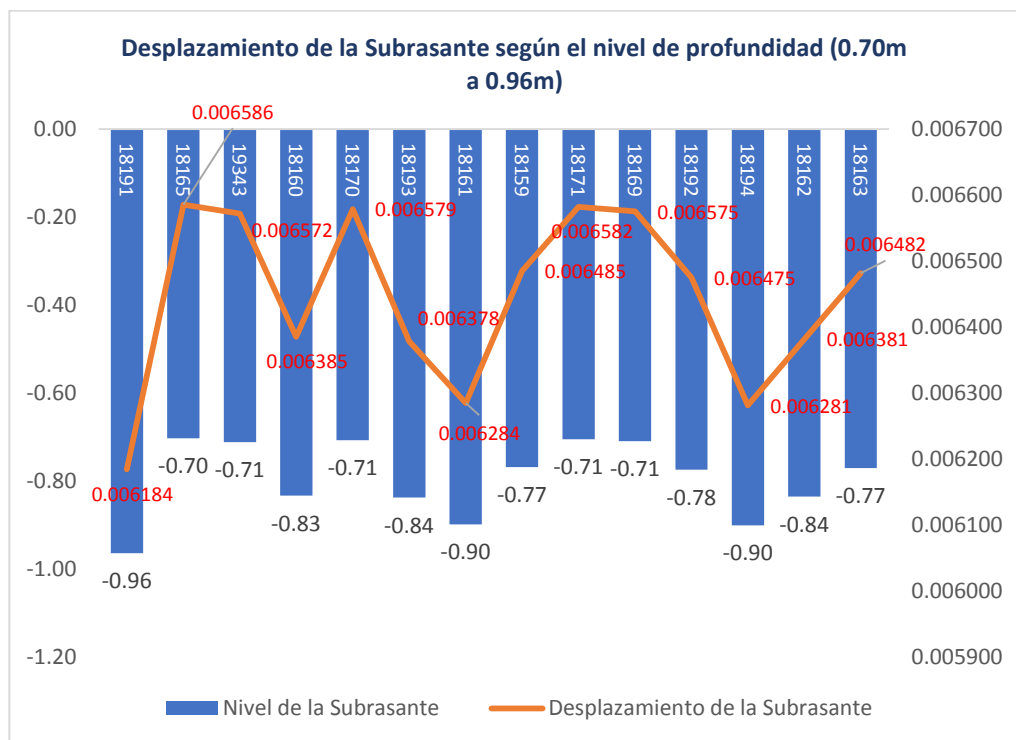
**Figura 99**

*Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0.34m a 0.61m) con un desplazamiento entre 6.73mm - 7.17mm, C-01.*



**Figura 100**

*Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0.70m a 0.96m) con un desplazamiento entre 6.18mm - 6.59mm, C-01.*



De acuerdo a los resultados obtenidos se resume el análisis de la muestra C-01, en la subrasante de la Progresiva 09+760:

- La muestra C-01 de subrasante tiene CBR de 11.01, considerado como regular y aceptable a la resistencia de las cargas de los vehículos que transitan sin considerar mejoramiento de subrasante como base de la infraestructura vial, equivale según la guía del ASHTOO 93 de diseño a 11,861 PSI ó 81.78Mpa de su módulo resiliencia de la subrasante que oscilan dichos valores en los cuadros estadísticos de la simulación.
- Es un tipo es suelo Limo Arcilloso (SUCS: ML) en ASHTOO: A-7-5 Suelos arcillosos – 11, se clasifica como suelo fino y es considerable teniendo en cuenta que el 60% de su granulometría es fino, pero no es un suelo expansivo verificando en sus ensayos de Proctor Modificado de óptima humedad de 1.97 TN/m<sup>3</sup> y Máxima Densidad Seca de 7.20% y CBR.
- Tiene un Coeficiente Uniformidad 6 y Grado de Curvatura 1.50 donde indica que es un suelo bien gradado.
- La comparación del ensayo de corte directo con los datos de la simulación del Plaxis-2D varían de 0% 21% entre la deformación tangencial y el esfuerzo de corte de 45kpa a 48kpa de la curva de relación.
- Con respecto a la deformación unitaria del suelo con respecto a la profundidad de la subrasante, en 0.85 metros existe una magnitud deformación de 0.001638, esto considerando el mayor entre la deformación tangencial y angular del suelo ante las cargas dinámicas de vehículos.
- La correlación que hay entre el esfuerzo de corte de 40.87kpa y el esfuerzo normal de 42.9kpa forma una curva de resistencia en su estado elástico hasta

0.001533 de deformación según los esfuerzos indicados donde culmina a un estado plástico hasta 0.92 metros de profundidad de la subrasante.

- Con respecto a la falla de deformación permanente del pavimento flexible, existe un desplazamiento máximo de 7.8 milímetros considerado como falla estructural del pavimento flexible dentro de la simulación en el Plaxis-2D considerando en su estado plástico identificado con mayor distribución de las cargas a 0.80m en promedio de la subrasante, con un Módulo de Resiliencia de 92.5Mpa máximo y 76.3Mpa mínimo el cual tiene una correlación con el CBR con valores por encima (81.73Mpa) de la subrasante donde podemos considerar que las características mecánicas son aceptables para cumplir el periodo de vida de la infraestructura de 20 años evaluado en la muestra C-01.
- A pesar de la humedad natural de la subrasante, el tipo de suelo ASHTOO: A-7-5 Suelos arcillosos – 11 de la subrasante, suelo fino, cohesivo y no expansivo, que no requiere necesariamente un tratamiento para mejorar la subrasante ya que tiene una resistencia aceptable con un CBR regular de 11.01.
- Se interpreta los resultados en que la subrasante de la muestra de suelo C-01 del pavimento flexible existente tiene una falla de deformación permanente de 7.8 milímetros al llegar a su estado plástico hasta 0.80m de profundidad de la subrasante, cumpliendo su serviciabilidad dentro de los parámetros dentro del periodo de vida útil de la infraestructura vial, donde se analiza que el problema vendría a ser la falla por fatiga o el problema de proceso constructivo de la carpeta asfáltica conllevando también a la caracterización del material donde se muestra deterioro de la vía de esta primera capa

comprometiendo la base y subbases en algunas progresivas sobre todo en las precipitaciones.

**Muestra C-02, Subrasante de la Progresiva 16+940:**

**Tabla 40**

*Propiedades físicas de la muestra de suelo C-02.*

<b>Propiedades Físicas: Muestra C-02</b>	
Tipo de Suelo	Arcilla fina arenosa (CL) (A-4 Suelos limosos - 4), regular a malo
Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> ó TN/m <sup>3</sup> )	1.88
Contenido de Humedad del Suelo (%)	13.61
Límite líquido LL (%)	32.11
Límite plástico LP (%)	22.87
Ind. de Plasticidad IP (%)	9.24
Coef. de uniformidad (Cu):	6.00
Grado de curvatura (Cc):	1.50
Proctor Modificado (OGH gr/cm <sup>3</sup> vs MDS %)	1.800      10.65

**Tabla 41**

*Propiedades mecánicas de la muestra de suelo C-02.*

<b>Propiedades Mecánicas: Muestra C-02</b>	
Módulo de Elasticidad (Es)	50 MN/m <sup>2</sup> 50,000 KN/m <sup>2</sup> (Kpa)
Coeficiente de Poisson (v')	0.200
Coeficiente de Permeabilidad (k)	1 m/día      0.00116 cm/seg
Cohesión (C')	0.096 kg/cm <sup>2</sup> 9.4 KN/m <sup>2</sup> (Kpa)
Ángulo de Fricción	13.6
CBR (95% de la MDS y 0.1" de Penetración)	8.71

Una vez definido los parámetros obtenidos mediante ensayo en el laboratorio de la muestra C-02 en la subrasante, añadimos los parámetros de la carpeta asfáltica, base, subbase para poder realizar la simulación de evaluación del comportamiento del esfuerzo-deformación de la subrasante, por lo cual se realizará las conversiones a las unidades que solicita en el programa PLAXIS 2D para ingresar los datos de simulación.

**Tabla 42***Parámetros de entrada para la simulación en el PLAXIS 2D, C-02.*

<b>Parámetros de Entrada de Evaluación de la Subrasante - C-02</b>					
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Carpeta Asfáltica</b>	<b>Base</b>	<b>SubBase</b>	<b>Subrasante</b>
<b>Modelo Constitutivo del Material</b>	Modelo	Elástico Lineal	Elástico Lineal	Elástico Lineal	Mohr- Coulomb
<b>Tipo de Comportamiento del Material</b>	Tipo	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado
<b>Peso específico del Suelo no Saturado</b>	KN/m <sup>3</sup>	20.00	20.00	19.00	18.44
<b>Peso específico del Suelo Saturado</b>	KN/m <sup>3</sup>	23.00	24.00	23.00	20.95
<b>Permeabilidad en Dirección Horizontal</b>	m/día	1.00	0.50	0.50	1.00
<b>Permeabilidad en Dirección Vertical</b>	m/día	1.00	0.50	0.50	1.00
<b>Módulo de Young</b>	KN/m <sup>2</sup>	1,400,000.00	300,000.00	200,000.00	50,000.00
<b>Coefficiente Poisson</b>	-	0.35	0.30	0.25	0.20

El diseño de las capas del pavimento flexible dentro del expediente técnico donde ya se encuentra ejecutado y operativo, se comprueba según los datos el tiempo de vida útil de la vía proyectado a 20 años, ingresando el módulo de resiliencia, el espesor de cada capa, su IMD y ESAL calculado se verificó mediante el software IMT-PAVE los parámetros de entrada y el tiempo de vida que refleja las ante las fallas por fatiga y deformación permanente.

## Figura 101

Tiempo de vida útil del pavimento flexible según el diseño en el expediente técnico enfocado a la Serviciabilidad de la vía, con el software IMT-Pave define la vida útil ante fallas por fatiga y deformación permanente promedio de 20 años.

The screenshot displays the IMT-PAVE 3.0 software interface. The main window is titled "ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO" and contains a table with the following data:

No. de Capa	Nombre Capa	Espesor (cm)	Módulo (MPa)
1	Carpeta Asfáltica	10	1400
2	Base Granular	30	300
3	Sub Base	40	200
4	Capa semi-infinita		50

To the right of the table is a 3D diagram of the pavement structure with layers labeled "carpeta", "base", and "sub-base". Below the table are icons for adding (+) and deleting (trash) layers, and a button labeled "Ejecuta Análisis Espectral".

The "RESULTADOS" section shows the following values:

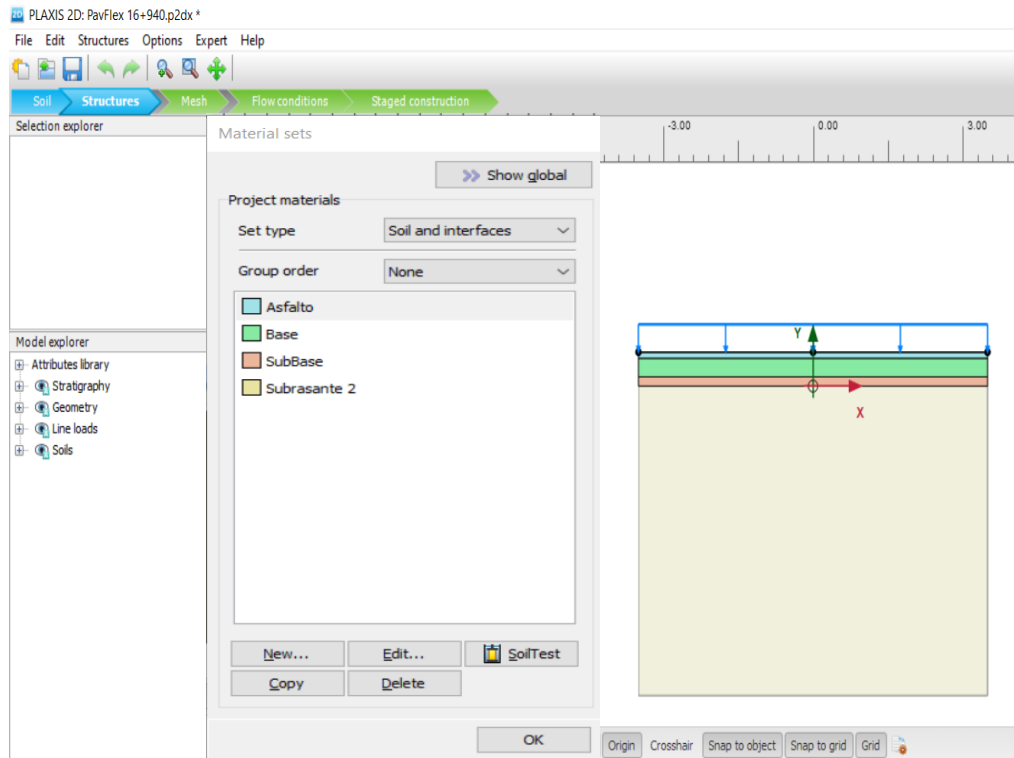
- Vida por fatiga (años): 18.5
- Vida por deformación (años): > 20

Se realiza el diseño del pavimento flexible en el PLAXIS-2D con los resultados obtenidos como parámetros de entrada, generando las mallas y nodos con elementos de forma geométrica triangular de 15 nodos cada una para que la malla generada sea fina y nos proporcione información detallada de cada elemento y nodo según los datos ingresados, luego elegimos los nodos de análisis para generar nuestra información estadística de los parámetros que deseamos analizar:



**Figura 102**

*Ingreso de parámetros de entrada de cada capa del pavimento flexible en Plaxis-2D, C-02.*



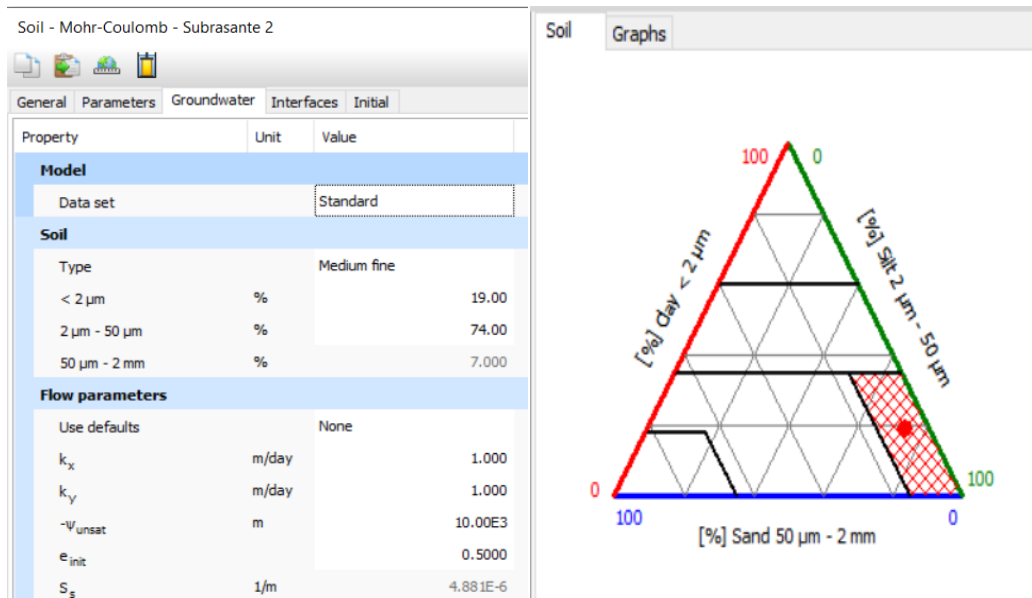
**Figura 103**

*Parámetros de entrada del suelo en Plaxis 2D, peso específico del suelo no saturado y saturado, módulo de elasticidad, Coeficiente de Poisson, Cohesión y ángulo de fricción interna de C-01.*

Soil - Mohr-Coulomb - Subrasante 2			Soil - Mohr-Coulomb - Subrasante 2		
Property	Unit	Value	Property	Unit	Value
<b>Material set</b>			<b>Stiffness</b>		
Identification		Subrasante 2	$E'$	kN/m <sup>2</sup>	50.00E3
Material model		Mohr-Coulomb	$\nu'$ (nu)		0.2000
Drainage type		Drained	<b>Alternatives</b>		
Colour		RGB 232, 227, 161	G	kN/m <sup>2</sup>	20.83E3
Comments			$E_{oed}$	kN/m <sup>2</sup>	55.56E3
<b>General properties</b>			<b>Strength</b>		
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	18.44	$c'_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	9.400
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	21.50	$\phi'$ (phi)	°	13.60
			$\psi$ (psi)	°	0.000

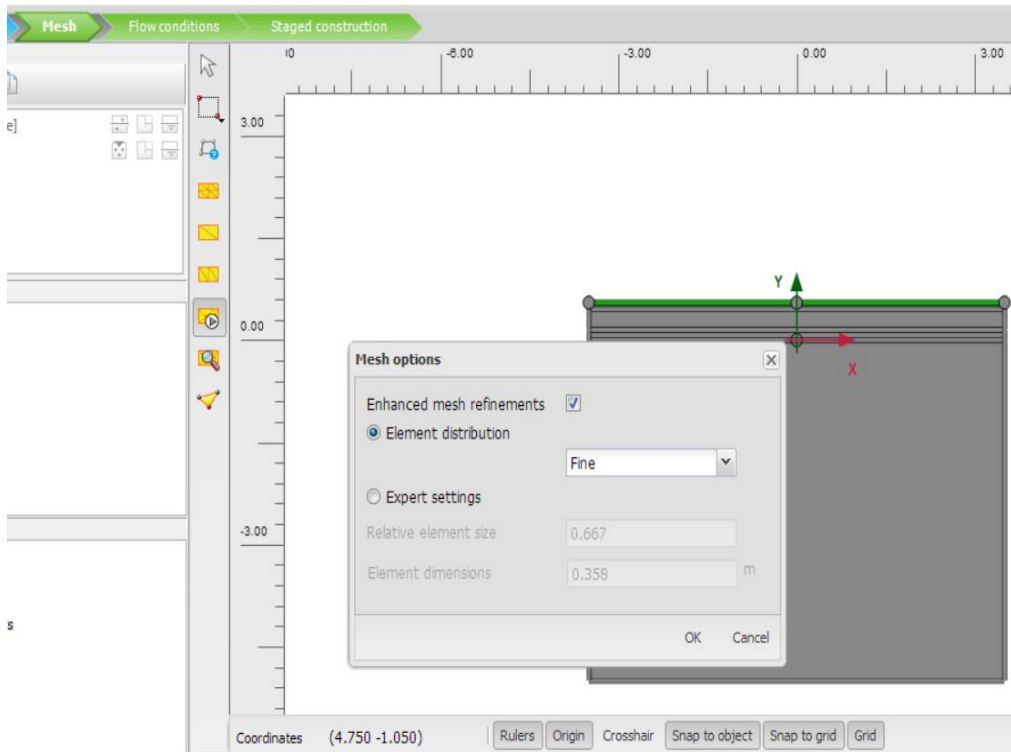
## Figura 104

Parámetros de entrada del suelo en Plaxis 2D, coeficiente de permeabilidad horizontal y vertical, tipo de suelo de C-02.



## Figura 105

Generamos las mallas configurado geométricamente de forma triangular con 15 nodos cada elemento, C-02.



**Figura 106**

Configuración de fase inicial del pavimento flexible, sin considerar las cargas de vehículo con un nivel freático a 2 metros de la subrasante, C-02.

Name	Value
<b>General</b>	
ID	Initial phase [InitialPhase]
Calculation type	K0 procedure
Loading type	Staged construction
$\Sigma M_{weight}$	1.000
Pore pressure calculation type	Phreatic
First step	0
Last step	0
Design approach	(None)
Special option	0
<b>Deformation control parameters</b>	
Updated water pressure	<input type="checkbox"/>
Ignore suction	<input checked="" type="checkbox"/>
<b>Reached values</b>	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	0.000
ForceX - Reached total force X	0.000 kN
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN
Pmax - Reached max pp	0.000 kN/m <sup>2</sup>
$\Sigma M_{stage}$ - Reached phase proportion	0.000
$\Sigma M_{weight}$ - Reached weight proportion	1.000
$\Sigma M_{sf}$ - Reached safety factor	1.000

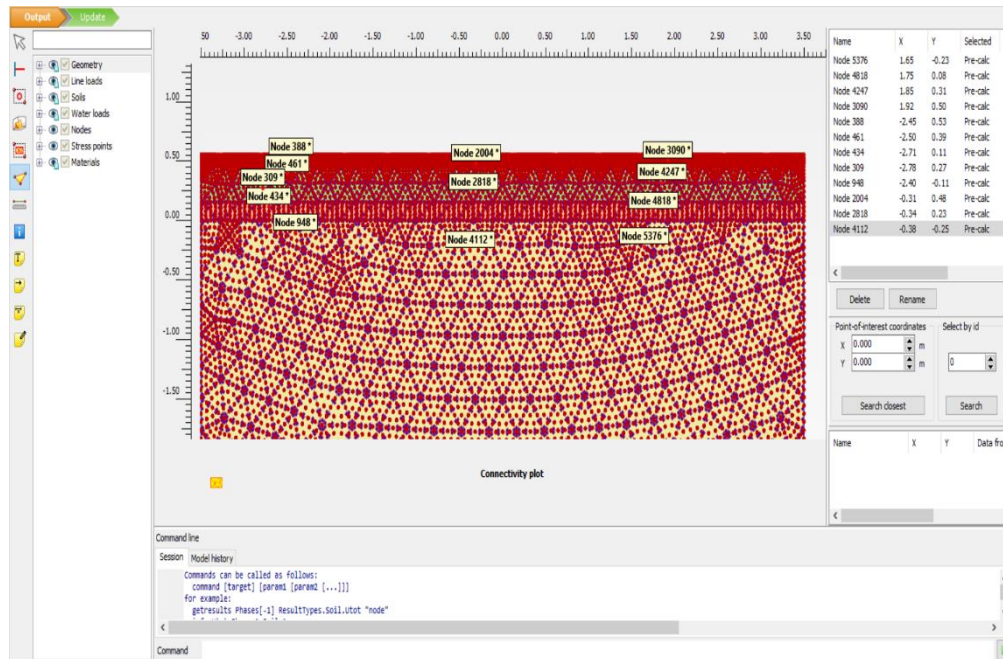
**Figura 107**

Configuración de fase 1 del pavimento flexible para el cálculo hasta un estado plástico que nos permitirá evaluar las deformaciones ante las cargas de los vehículos, C-02.

Name	Value
<b>General</b>	
ID	Fase 1 [Phase_1]
Start from phase	Initial phase
Calculation type	Plastic
Loading type	Staged construction
$\Sigma M_{stage}$	1.000
$\Sigma M_{weight}$	1.000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Time interval	0.000 day
First step	1
Last step	3
Design approach	(None)
Special option	0
<b>Deformation control parameters</b>	
Ignore undr. behaviour (A,B)	<input type="checkbox"/>
Reset displacements to zero	<input checked="" type="checkbox"/>
Reset small strain	<input checked="" type="checkbox"/>
Reset state variables	<input type="checkbox"/>
Updated mesh	<input type="checkbox"/>
Updated water pressure	<input type="checkbox"/>
Ignore suction	<input checked="" type="checkbox"/>
Cavitation cut-off	<input type="checkbox"/>
Cavitation stress	100.0 kN/m <sup>2</sup>

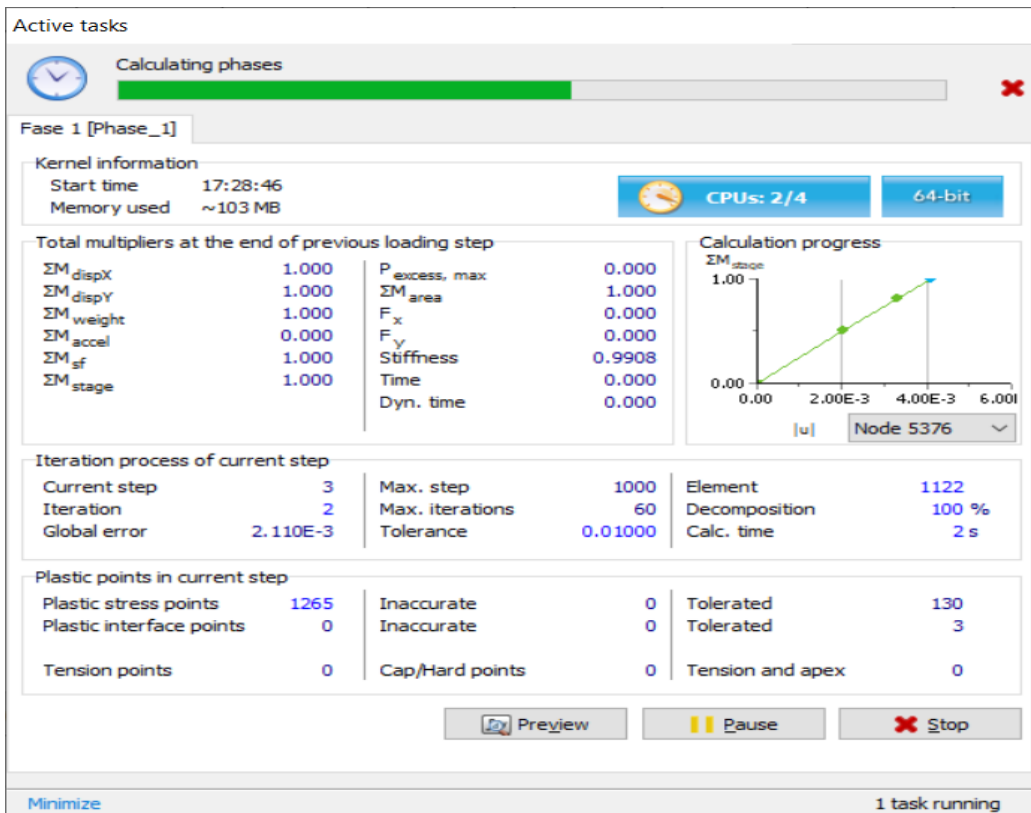
**Figura 108**

Generando las mallas y nodos definimos los puntos de los nodos de análisis, C-02.



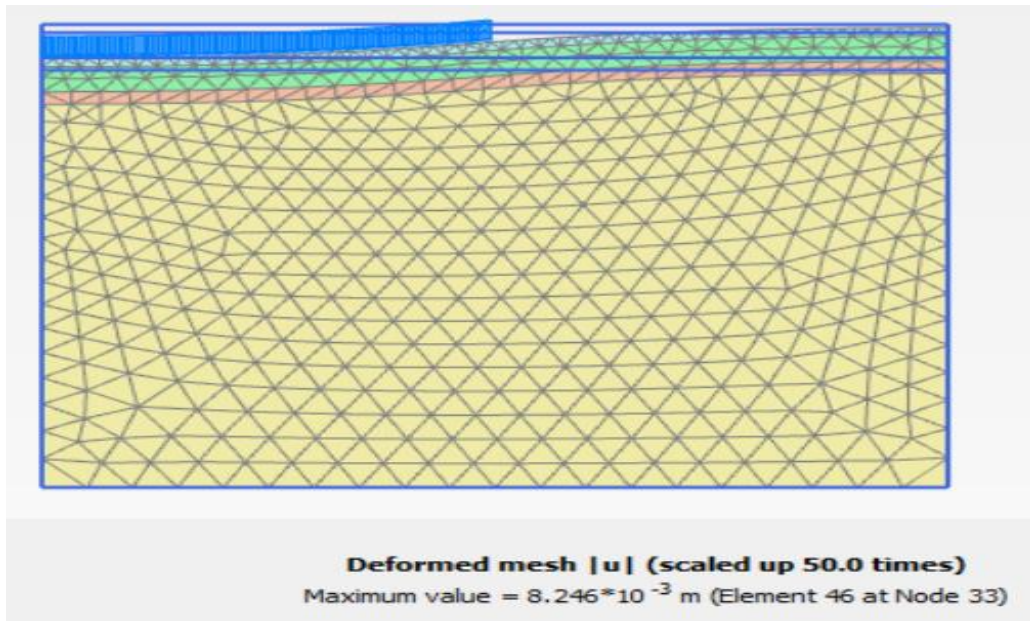
**Figura 109**

Generado las mallas y asignado los nodos, se calcula la fase inicial del modelo y la fase plástica de la simulación del pavimento flexible, C-01.



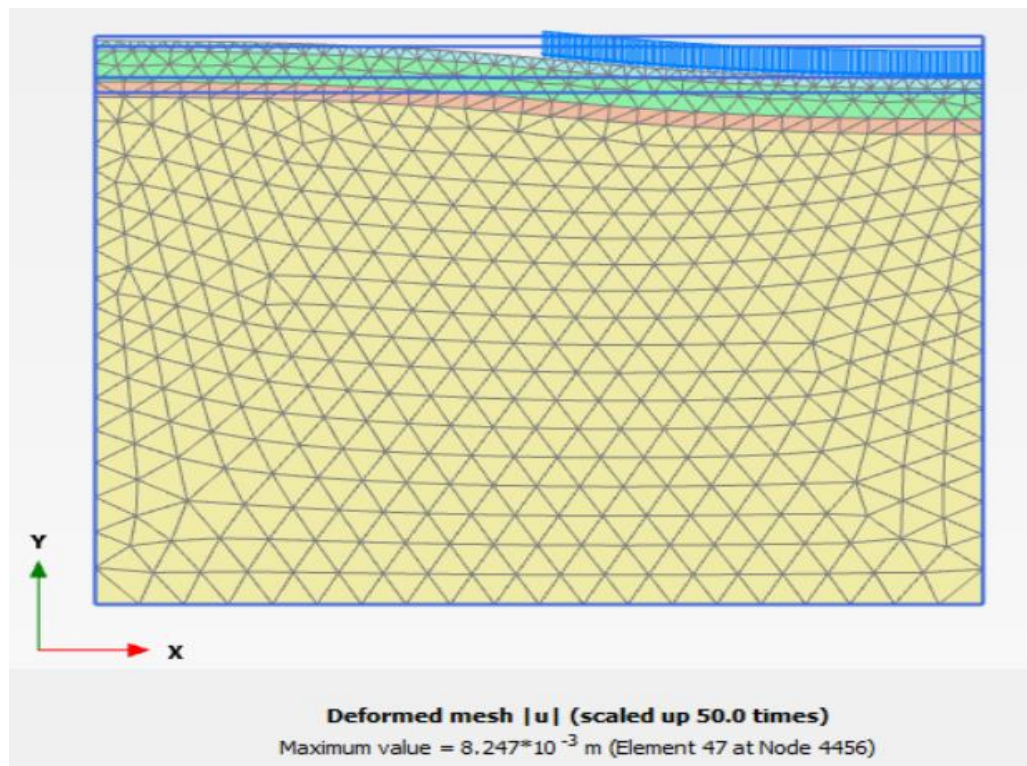
### Figura 110

Muestra la deformación máxima del carril izquierdo del pavimento flexible, de acuerdo a su IMD y ESAL en su análisis plástico con 8.246 mm de deformación permanente de la estructura vial C-02.



### Figura 111

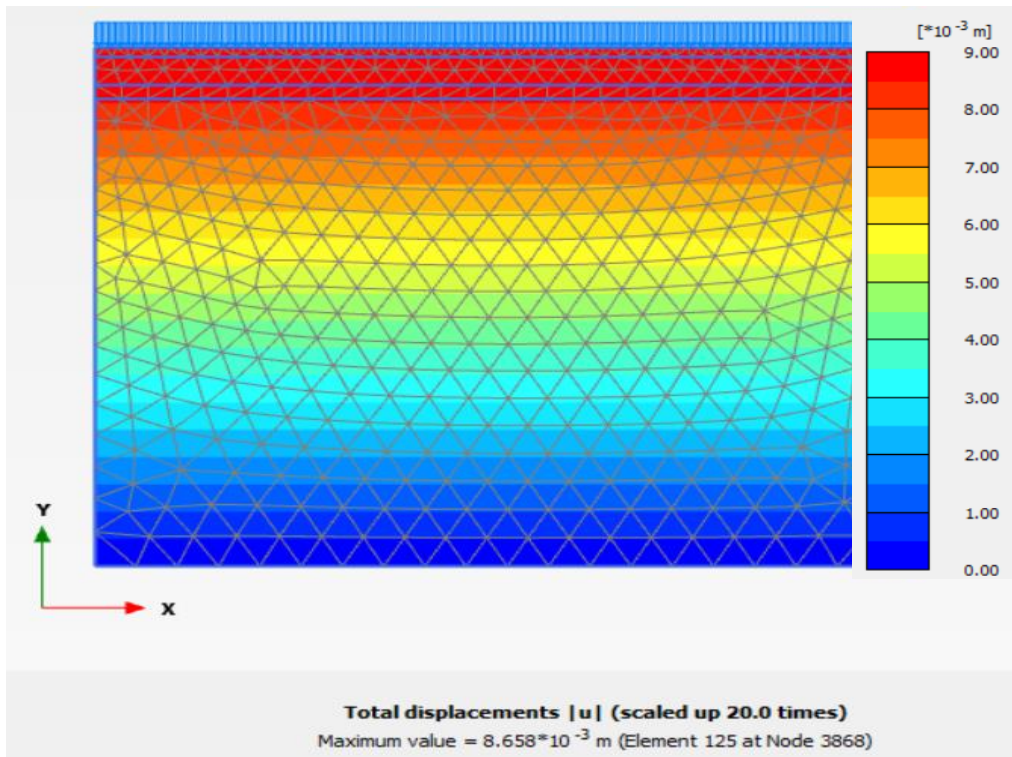
Muestra la deformación máxima del carril derecho del pavimento flexible, de acuerdo a su IMD y ESAL en su análisis plástico con 8.247 mm de deformación permanente de la estructura vial C-02.





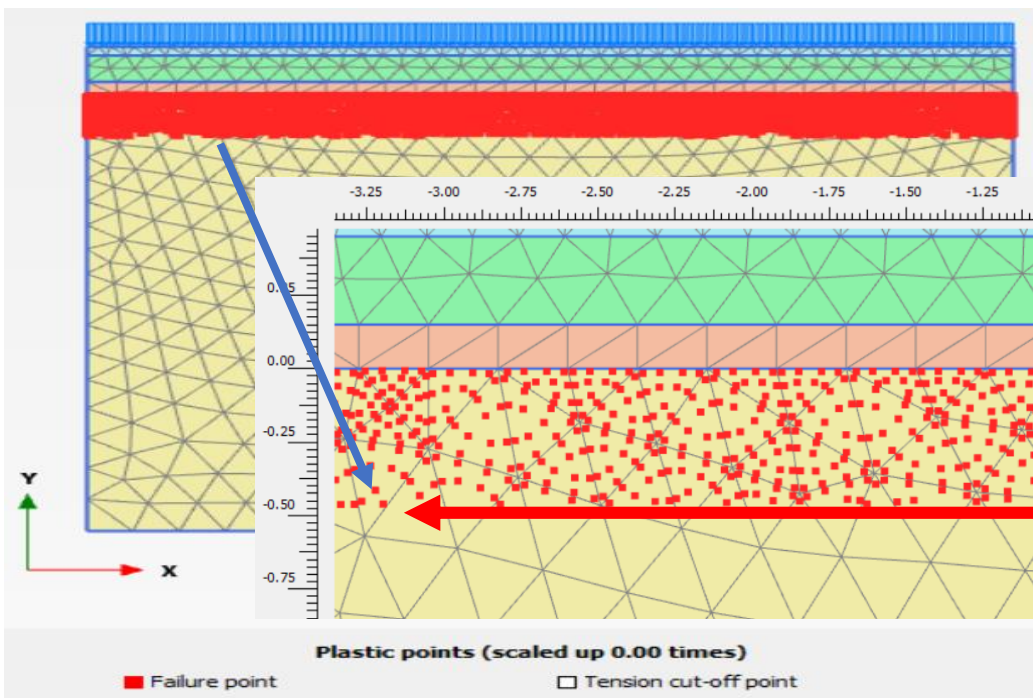
**Figura 112**

Muestra la deformación máxima de ambos carriles del pavimento flexible, con 8.658 mm de deformación permanente, en el análisis hasta su estado plástico de la subrasante, C-02.



**Figura 113**

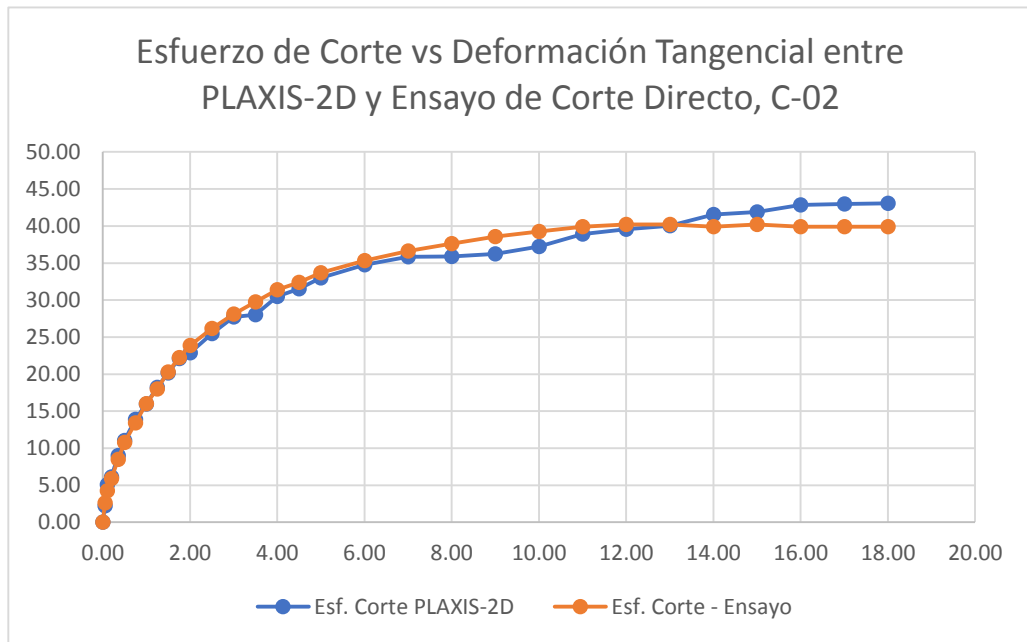
Muestra los puntos de falla de desplazamiento en la deformación permanente dentro del estado plástico, hasta una profundidad de 0.50m de la subrasante, C-02.



Se identifica en los resultados del PLAXIS-2D el desplazamiento de la subrasante en cada carril en un promedio de 8.25 mm y en ambos carriles 8.66mm en su estado plástico, donde en el punto de falla de la subrasante falla llega hasta 0.50m de profundidad según la Figura 111, a continuación, se detalla los resultados obtenidos mediante cuadros estadísticos y tablas con los parámetros de salida para el análisis de los resultados de la subrasante de la muestra C-02, Progresiva 16+940.

**Figura 114**

*Comparativo del Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial del PLAXIS 2D y del ensayo en laboratorio, C-02.*



**Tabla 43**

*Comparativo del Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial del PLAXIS 2D y del ensayo en laboratorio, C-02.*

Comparación del Esfuerzo de Corte vs Desplazamiento Tangencial de Simulación y Laboratorio - C-02				
Nº	Def. Tangencial	PLAXIS-2D	Ensayo C-02	% Diferencia
1	0.00	0.00	0.00	0%
2	0.05	2.21	2.62	16%
3	0.10	5.08	4.25	-20%
4	0.20	6.12	5.89	-4%

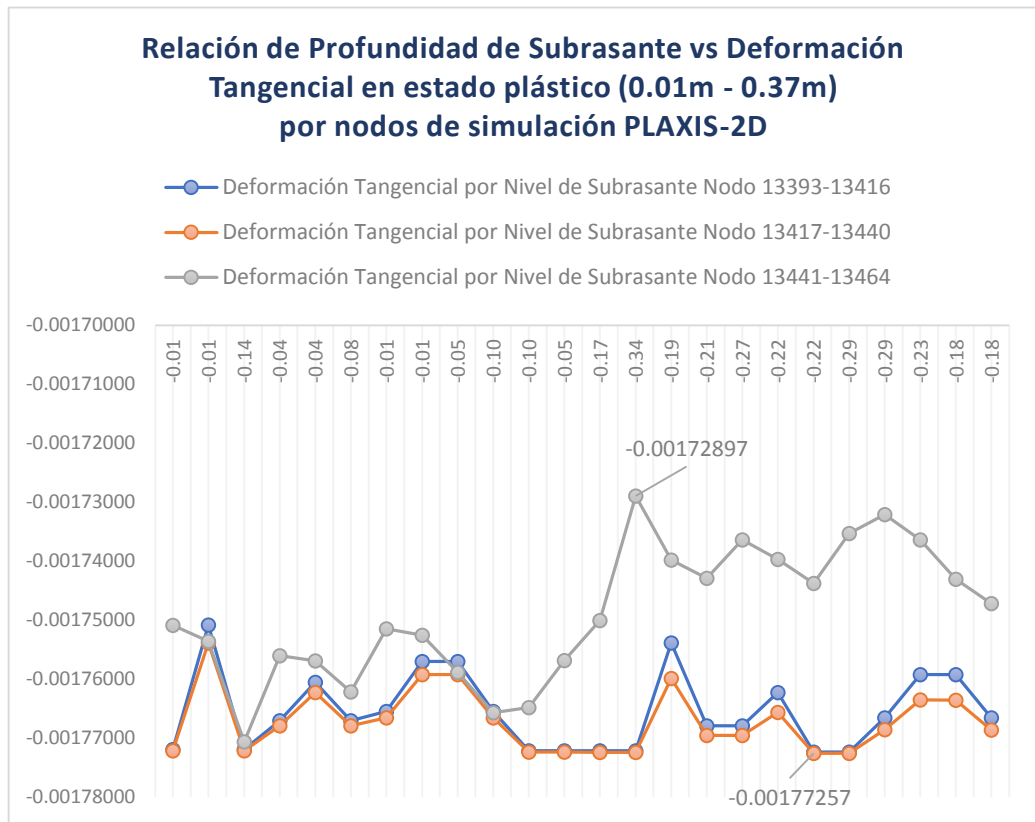
<b>5</b>	0.35	9.02	8.50	-6%
<b>6</b>	0.50	11.05	10.79	-2%
<b>7</b>	0.75	13.88	13.41	-4%
<b>8</b>	1.00	15.96	16.02	0%
<b>9</b>	1.25	18.20	17.99	-1%
<b>10</b>	1.50	20.15	20.27	1%
<b>11</b>	1.75	22.10	22.24	1%
<b>12</b>	2.00	22.90	23.87	4%
<b>13</b>	2.50	25.46	26.16	3%
<b>14</b>	3.00	27.72	28.12	1%
<b>15</b>	3.50	28.01	29.76	6%
<b>16</b>	4.00	30.50	31.39	3%
<b>17</b>	4.50	31.52	32.37	3%
<b>18</b>	5.00	33.01	33.68	2%
<b>19</b>	6.00	34.77	35.32	2%
<b>20</b>	7.00	35.84	36.62	2%
<b>21</b>	8.00	35.88	37.61	5%
<b>22</b>	9.00	36.23	38.59	6%
<b>23</b>	10.00	37.21	39.24	5%
<b>24</b>	11.00	38.92	39.89	2%
<b>25</b>	12.00	39.56	40.22	2%
<b>26</b>	13.00	40.05	40.22	0%
<b>27</b>	14.00	41.53	39.89	-4%
<b>28</b>	15.00	41.88	40.22	-4%
<b>29</b>	16.00	42.86	39.89	-7%
<b>30</b>	17.00	42.99	39.89	-8%
<b>31</b>	18.00	43.08	39.89	-8%

Las deformaciones tangenciales y angulares, con los esfuerzos de corte y normal en los nodos generados en la simulación con el software PLAXIS-2D, muestran el comportamiento en el estado plástico en la subrasante en los niveles de profundidad desde el nivel 0m hasta 0.50m de la subrasante donde indica de color rojo en la figura N° 111 el cual se detalla las deformaciones y posteriormente los desplazamientos del suelo C-02.



**Figura 115**

Profundidad de la Subrasante vs Deformación tangencial en su estado plástico, donde se observa como máxima deformación de 0.01 m a -0.37m de profundidad C-02.



**Tabla 44**

Comportamiento de la subrasante, deformación tangencial según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.01m a 0.37m por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-02.

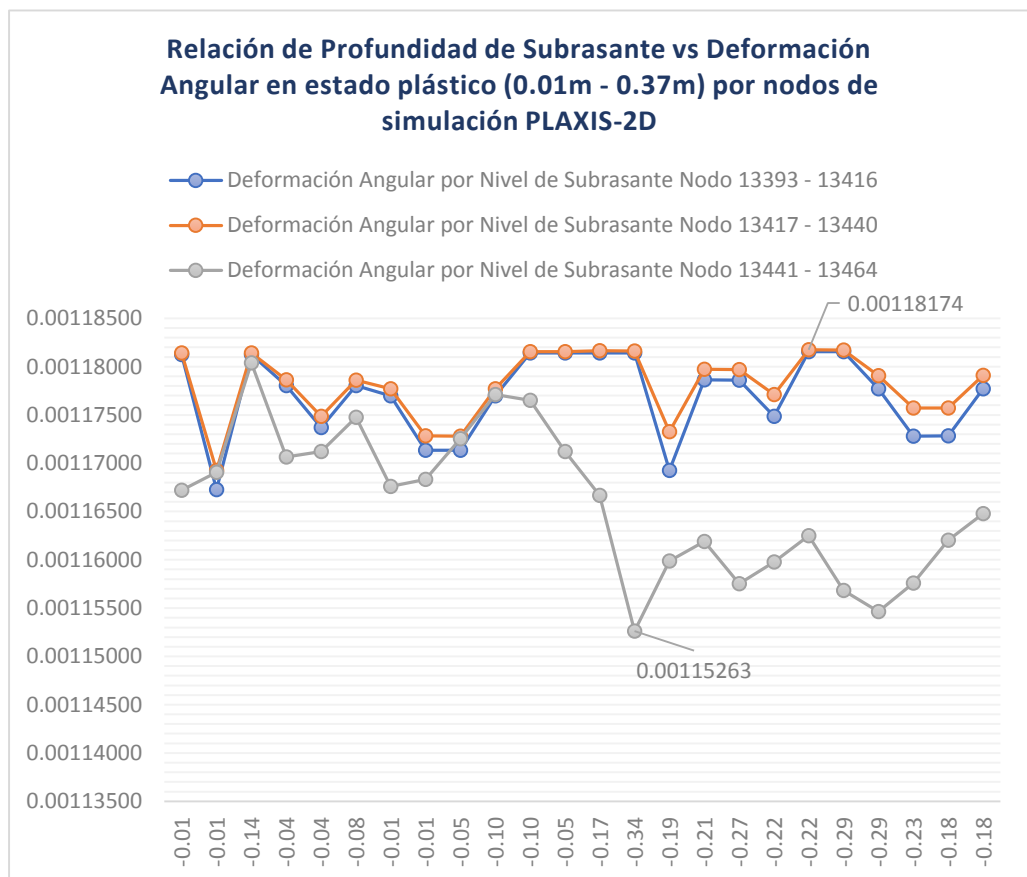
Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.01m - 0.37m) y su deformación tangencial por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-02			
N°	Nodos de Subrasante, C-02	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Tangencial
1	Clus. 4 - El. 1117 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.01	-0.001772
2		-0.19	-0.001751
3		-0.01	-0.001772
4		-0.05	-0.001767
5		-0.11	-0.001761
6		-0.05	-0.001767
7		-0.07	-0.001765
8		-0.14	-0.001757
9		-0.14	-0.001757
10		-0.07	-0.001765
11		-0.01	-0.001772
12		-0.01	-0.001772

13	Clus. 4 - El. 1118 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.01	-0.001772
14		-0.01	-0.001772
15		-0.16	-0.001754
16		-0.05	-0.001768
17		-0.05	-0.001768
18		-0.09	-0.001762
19		-0.01	-0.001772
20		-0.01	-0.001772
21		-0.06	-0.001767
22		-0.12	-0.001759
23		-0.12	-0.001759
24		-0.06	-0.001767
25	Clus. 4 - El. 1119 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.01	-0.001772
26		-0.16	-0.001754
27		-0.01	-0.001772
28		-0.05	-0.001768
29		-0.09	-0.001762
30		-0.05	-0.001768
31		-0.06	-0.001767
32		-0.12	-0.001759
33		-0.12	-0.001759
34		-0.06	-0.001767
35		-0.01	-0.001772
36		-0.01	-0.001772
37	Clus. 4 - El. 1120 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.01	-0.001772
38		-0.01	-0.001772
39		-0.11	-0.001760
40		-0.03	-0.001770
41		-0.03	-0.001770
42		-0.06	-0.001766
43		-0.01	-0.001773
44		-0.01	-0.001773
45		-0.04	-0.001769
46		-0.08	-0.001764
47		-0.08	-0.001764
48		-0.04	-0.001769
49	Clus. 4 - El. 1121 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.19	-0.001751
50		-0.17	-0.001754
51		-0.02	-0.001771
52		-0.15	-0.001756
53		-0.14	-0.001757
54		-0.09	-0.001762
55		-0.18	-0.001751
56		-0.17	-0.001753
57		-0.12	-0.001759
58		-0.06	-0.001766

59	Clus. 4 - El. 1122 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.07	-0.001765
60		-0.14	-0.001757
61		-0.19	-0.001750
62		-0.37	-0.001729
63		-0.28	-0.001740
64		-0.25	-0.001743
65		-0.31	-0.001736
66		-0.28	-0.001740
67		-0.25	-0.001744
68		-0.32	-0.001735
69		-0.34	-0.001732
70		-0.31	-0.001736
71		-0.25	-0.001743
72		-0.22	-0.001747

**Figura 116**

*Profundidad de la Subrasante vs Deformación angular en su estado plástico, donde se observa como máxima deformación de 0.01 m a 0.37 m de profundidad de la subrasante, C-02.*



**Tabla 45**

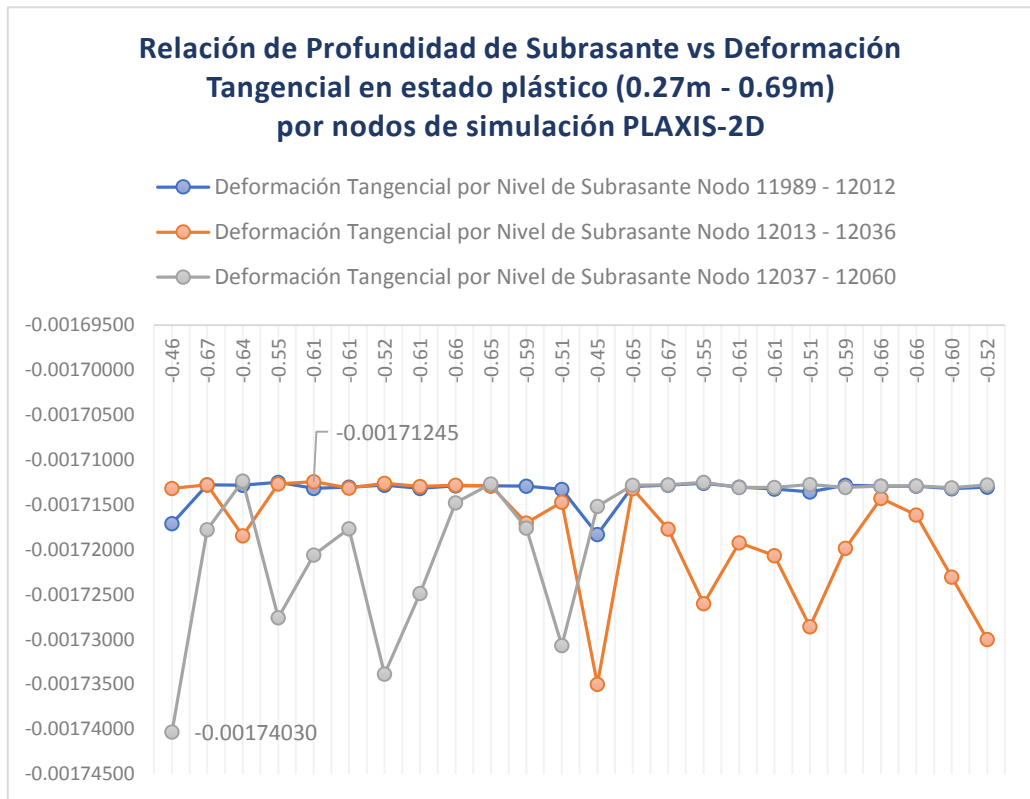
*Comportamiento de la subrasante, deformación angular según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.01 m a 0.37 m de profundidad por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-02.*

Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.01m - 0.37m) y su deformación tangencial por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-02.			
N°	Nodos de Subrasante, C-02	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Angular
1	Clus. 4 - El. 1117 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.01	0.001181
2		-0.19	0.001167
3		-0.01	0.001181
4		-0.05	0.001178
5		-0.11	0.001174
6		-0.05	0.001178
7		-0.07	0.001177
8		-0.14	0.001171
9		-0.14	0.001171
10		-0.07	0.001177
11		-0.01	0.001181
12		-0.01	0.001181
13	Clus. 4 - El. 1118 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.01	0.001181
14		-0.01	0.001181
15		-0.16	0.001169
16		-0.05	0.001179
17		-0.05	0.001179
18		-0.09	0.001175
19		-0.01	0.001182
20		-0.01	0.001182
21		-0.06	0.001178
22		-0.12	0.001173
23		-0.12	0.001173
24		-0.06	0.001178
25	Clus. 4 - El. 1119 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.01	0.001181
26		-0.16	0.001169
27		-0.01	0.001181
28		-0.05	0.001179
29		-0.09	0.001175
30		-0.05	0.001179
31		-0.06	0.001178
32		-0.12	0.001173
33		-0.12	0.001173
34		-0.06	0.001178
35		-0.01	0.001182
36		-0.01	0.001182
37		-0.01	0.001182
38		-0.01	0.001182

39	Clus. 4 - El. 1120 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.11	0.001173
40		-0.03	0.001180
41		-0.03	0.001180
42		-0.06	0.001177
43		-0.01	0.001182
44		-0.01	0.001182
45		-0.04	0.001179
46		-0.08	0.001176
47		-0.08	0.001176
48		-0.04	0.001179
49		Clus. 4 - El. 1121 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.19
50	-0.17		0.001169
51	-0.02		0.001180
52	-0.15		0.001171
53	-0.14		0.001171
54	-0.09		0.001175
55	-0.18		0.001168
56	-0.17		0.001168
57	-0.12		0.001173
58	-0.06		0.001177
59	-0.07		0.001177
60	-0.14	0.001171	
61	Clus. 4 - El. 1122 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.19	0.001167
62		-0.37	0.001153
63		-0.28	0.001160
64		-0.25	0.001162
65		-0.31	0.001158
66		-0.28	0.001160
67		-0.25	0.001162
68		-0.32	0.001157
69		-0.34	0.001155
70		-0.31	0.001158
71		-0.25	0.001162
72	-0.22	0.001165	

**Figura 117**

Profundidad de la Subrasante vs Deformación Tangencial en su estado plástico, de 0.27m a 0.69m de profundidad de la subrasante C-02.



**Tabla 46**

Comportamiento de la subrasante, deformación tangencial según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.27m a 0.69m de profundidad por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-02.

Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.27m - 0.69m) y su deformación tangencial por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-02.			
N°	Nodo de Subrasante, C-02	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Tangencial
1	Clus. 4 - El. 1000 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.46	-0.00171709
2		-0.67	-0.00171279
3		-0.64	-0.00171283
4		-0.55	-0.00171251
5		-0.61	-0.00171317
6		-0.61	-0.00171304
7		-0.52	-0.00171283
8		-0.61	-0.00171318
9		-0.66	-0.00171290
10		-0.65	-0.00171291
11		-0.59	-0.00171294
12		-0.51	-0.00171328

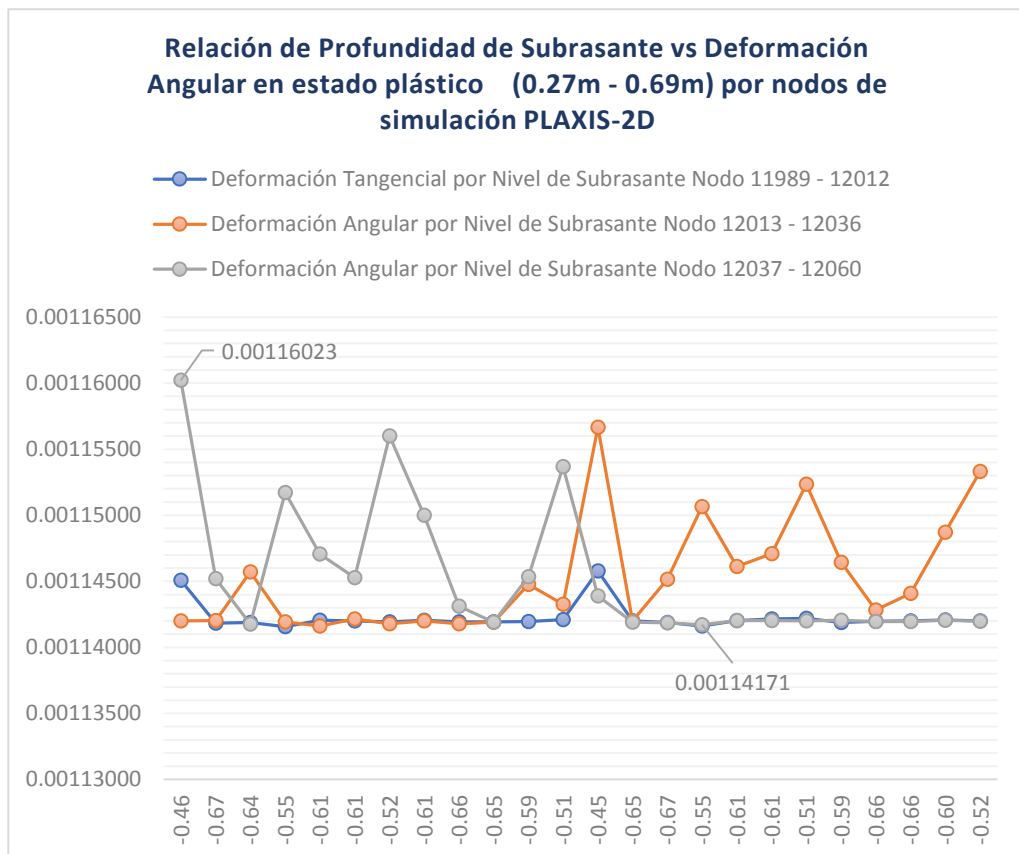
13	Clus. 4 - El. 1001 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.45	-0.00171832
14		-0.65	-0.00171299
15		-0.67	-0.00171281
16		-0.55	-0.00171261
17		-0.61	-0.00171303
18		-0.61	-0.00171324
19		-0.51	-0.00171357
20		-0.59	-0.00171283
21		-0.66	-0.00171294
22		-0.66	-0.00171293
23		-0.60	-0.00171321
24		-0.52	-0.00171305
25	Clus. 4 - El. 1002 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.50	-0.00171320
26		-0.69	-0.00171281
27		-0.45	-0.00171846
28		-0.53	-0.00171270
29		-0.59	-0.00171245
30		-0.52	-0.00171314
31		-0.56	-0.00171261
32		-0.63	-0.00171297
33		-0.62	-0.00171284
34		-0.52	-0.00171292
35		-0.47	-0.00171702
36		-0.49	-0.00171471
37	Clus. 4 - El. 1003 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.32	-0.00173501
38		-0.50	-0.00171322
39		-0.46	-0.00171770
40		-0.39	-0.00172603
41		-0.45	-0.00171924
42		-0.44	-0.00172066
43		-0.37	-0.00172857
44		-0.44	-0.00171984
45		-0.49	-0.00171429
46		-0.47	-0.00171616
47		-0.42	-0.00172304
48		-0.36	-0.00173001
49	Clus. 4 - El. 1004 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.27	-0.00174030
50		-0.46	-0.00171779
51		-0.54	-0.00171235
52		-0.38	-0.00172758
53		-0.44	-0.00172059
54		-0.46	-0.00171768
55		-0.33	-0.00173385
56		-0.40	-0.00172488
57		-0.49	-0.00171478
58		-0.52	-0.00171269



59	Clus. 4 - El. 1005 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.46	-0.00171761
60		-0.35	-0.00173070
61		-0.48	-0.00171519
62		-0.69	-0.00171283
63		-0.67	-0.00171280
64		-0.57	-0.00171250
65		-0.64	-0.00171307
66		-0.63	-0.00171308
67		-0.54	-0.00171277
68		-0.63	-0.00171307
69		-0.68	-0.00171293
70		-0.68	-0.00171291
71		-0.61	-0.00171311
72		-0.54	-0.00171278

**Figura 118**

*Profundidad de la Subrasante vs Deformación Angular en su estado plástico, de 0.27m a 0.69m de profundidad de la subrasante C-02.*



**Tabla 47**

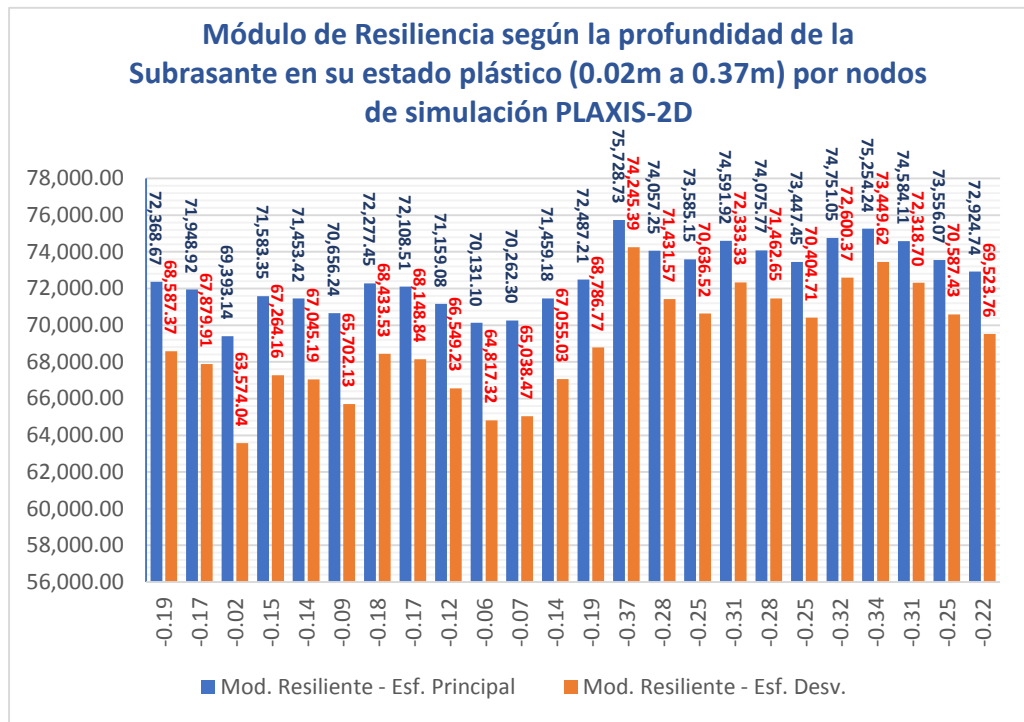
*Comportamiento de la subrasante, deformación angular según la profundidad de la subrasante en su estado plástico de 0.27m a 0.69m de profundidad por cada nodo de simulación en PLAXIS-2D en la muestra C-02.*

Profundidad de Subrasante en su estado plástico (0.27m - 0.69m) y su deformación angular por cada nodo de simulación PLAXIS-2D, C-02.			
N°	Nodo de Subrasante, C-02	Profundidad Subrasante (m)	Deformación Angular
1	Clus. 4 - El. 1000 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.46	0.00114509
2		-0.67	0.00114184
3		-0.64	0.00114187
4		-0.55	0.00114158
5		-0.61	0.00114206
6		-0.61	0.00114201
7		-0.52	0.00114193
8		-0.61	0.00114206
9		-0.66	0.00114193
10		-0.65	0.00114194
11		-0.59	0.00114196
12		-0.51	0.00114209
13	Clus. 4 - El. 1001 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.45	0.00114579
14		-0.65	0.00114201
15		-0.67	0.00114188
16		-0.55	0.00114161
17		-0.61	0.00114203
18		-0.61	0.00114215
19		-0.51	0.00114219
20		-0.59	0.00114187
21		-0.66	0.00114199
22		-0.66	0.00114199
23		-0.60	0.00114208
24		-0.52	0.00114200
25	Clus. 4 - El. 1002 Subrasante 2 Soil\_1\_1	-0.50	0.00114201
26		-0.69	0.00114202
27		-0.45	0.00114571
28		-0.53	0.00114193
29		-0.59	0.00114162
30		-0.52	0.00114214
31		-0.56	0.00114179
32		-0.63	0.00114201
33		-0.62	0.00114179
34		-0.52	0.00114190
35		-0.47	0.00114477
36		-0.49	0.00114327
37		-0.32	0.00115666
38		-0.50	0.00114199

39	Clus. 4 - El. 1003 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.46	0.00114516
40		-0.39	0.00115065
41		-0.45	0.00114611
42		-0.44	0.00114708
43		-0.37	0.00115235
44		-0.44	0.00114645
45		-0.49	0.00114283
46		-0.47	0.00114408
47		-0.42	0.00114870
48		-0.36	0.00115332
49		Clus. 4 - El. 1004 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.27
50	-0.46		0.00114519
51	-0.54		0.00114176
52	-0.38		0.00115172
53	-0.44		0.00114708
54	-0.46		0.00114528
55	-0.33		0.00115601
56	-0.40		0.00115000
57	-0.49		0.00114312
58	-0.52		0.00114190
59	-0.46		0.00114534
60	Clus. 4 - El. 1005 Subrasante 2 Soil\1\1	-0.35	0.00115367
61		-0.48	0.00114390
62		-0.69	0.00114190
63		-0.67	0.00114186
64		-0.57	0.00114171
65		-0.64	0.00114204
66		-0.63	0.00114203
67		-0.54	0.00114201
68		-0.63	0.00114206
69		-0.68	0.00114196
70		-0.68	0.00114195
71		-0.61	0.00114206
72	-0.54	0.00114198	

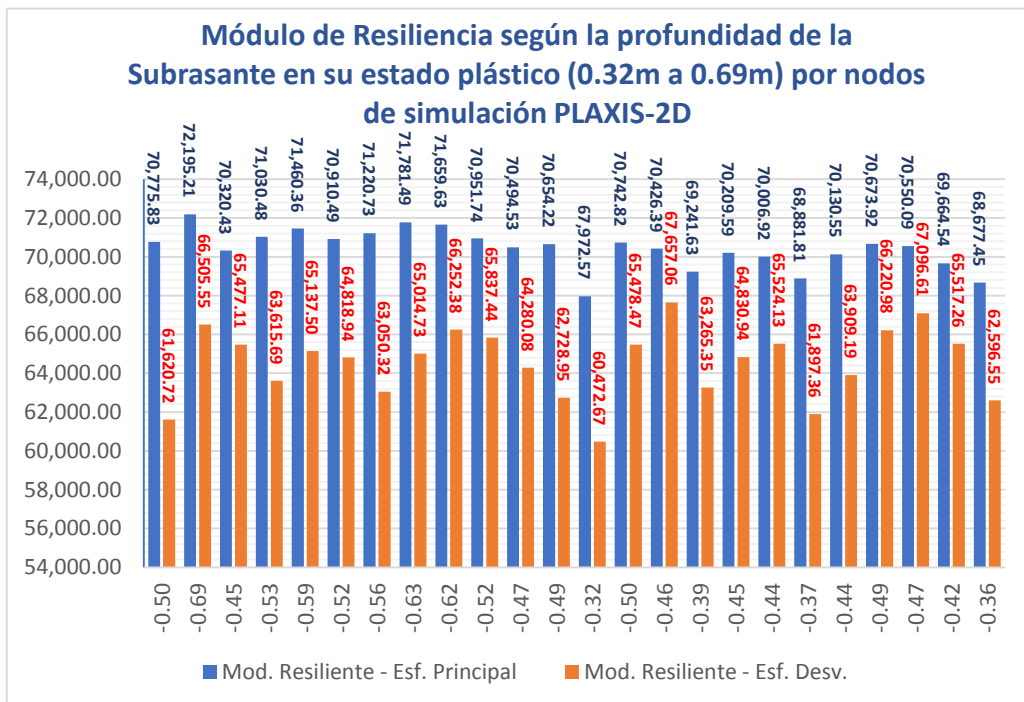
**Figura 119**

Módulo de Resiliencia de la Subrasante, de 0.02m a 0.37m de profundidad, como máximo 75.7Mpa y mínimo 63.6Mpa, C-02.



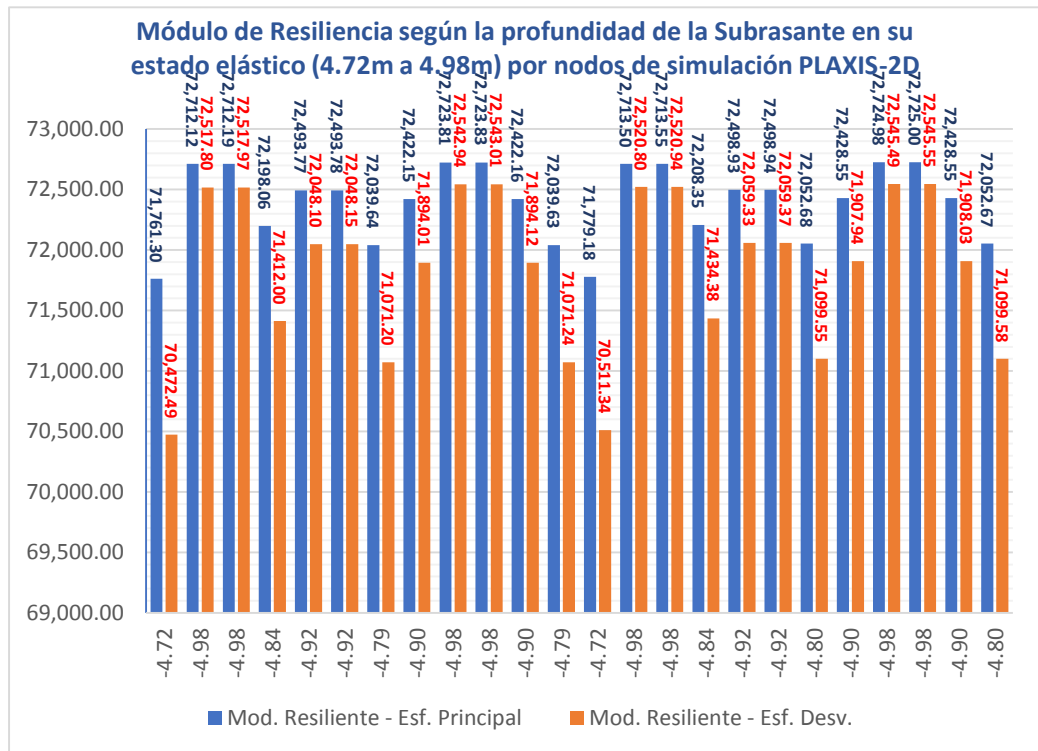
**Figura 120**

Módulo de Resiliencia de la Subrasante, de 0.40m a 0.92m de profundidad, como máximo 89.1Mpa y mínimo 72.7Mpa, C-02.



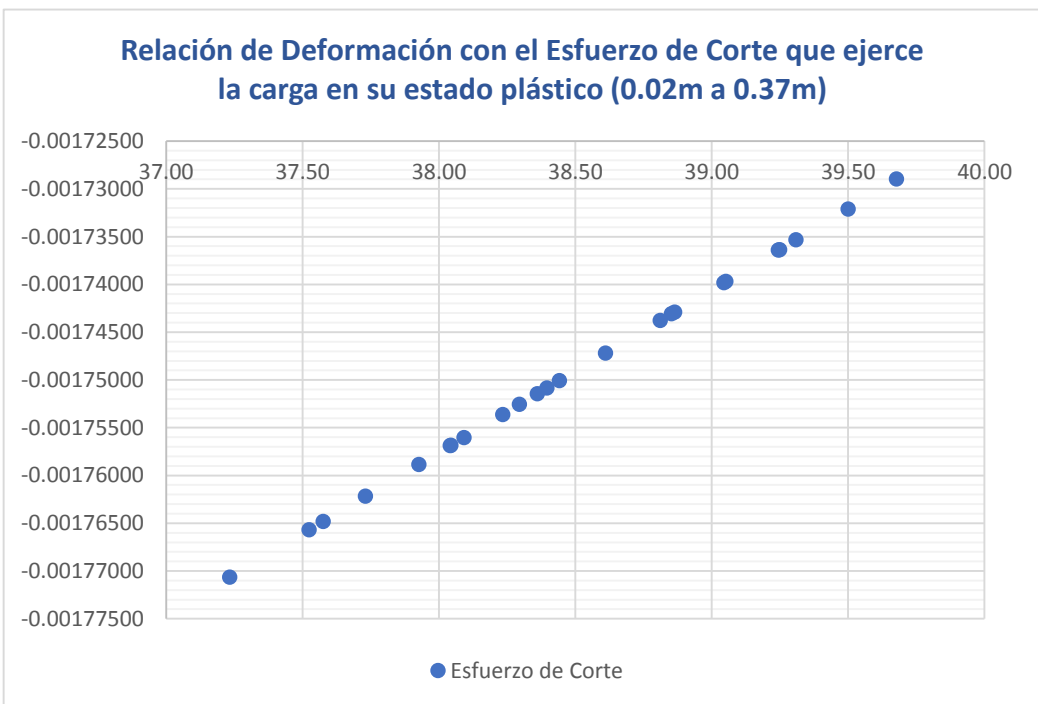
**Figura 121**

Módulo de Resiliencia de la Subrasante, de 4.72m a 4.98m de profundidad respecto a sus esfuerzos de corte y normal, como máximo 72.8Mpa y mínimo 70.5Mpa, C-02.



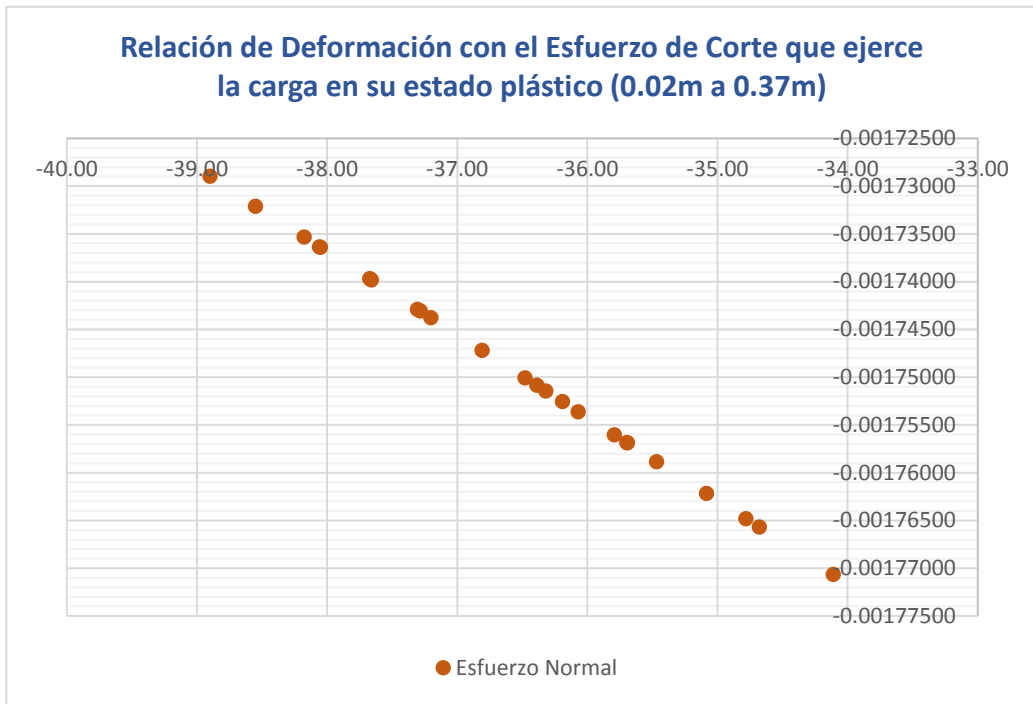
**Figura 122**

Esfuerzo de Corte vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.02m-0.37m de profundidad de 37.23Kpa a 39.68Kpa, C-02.



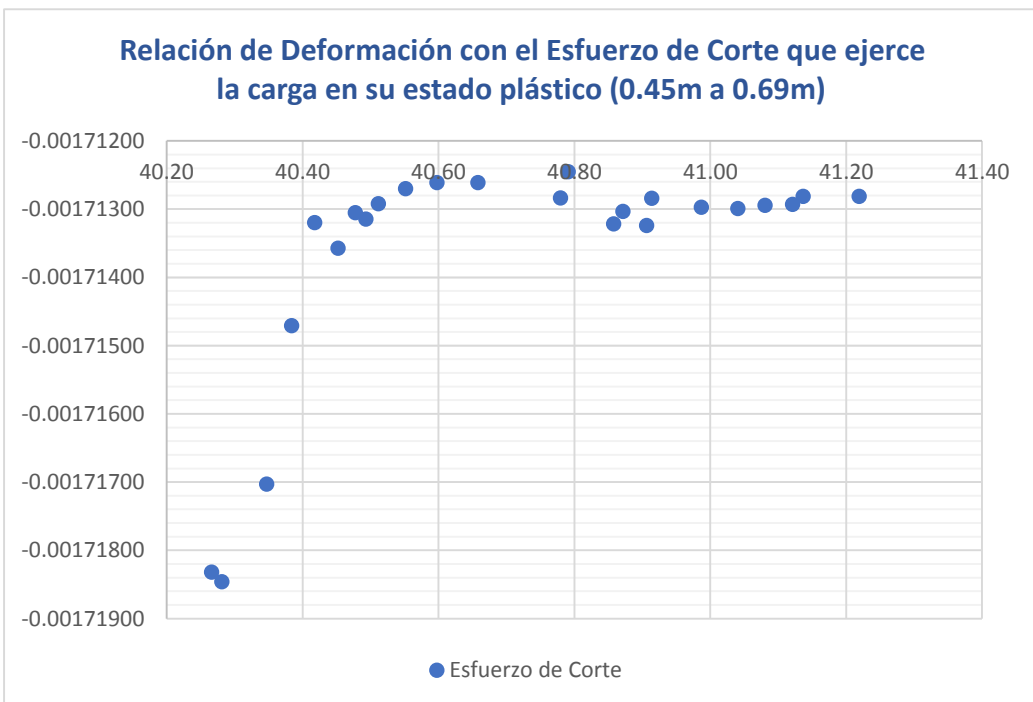
**Figura 123**

*Esfuerzo Normal vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.02m-0.37m de profundidad de -34.11Kpa a -38.90Kpa, C-02.*



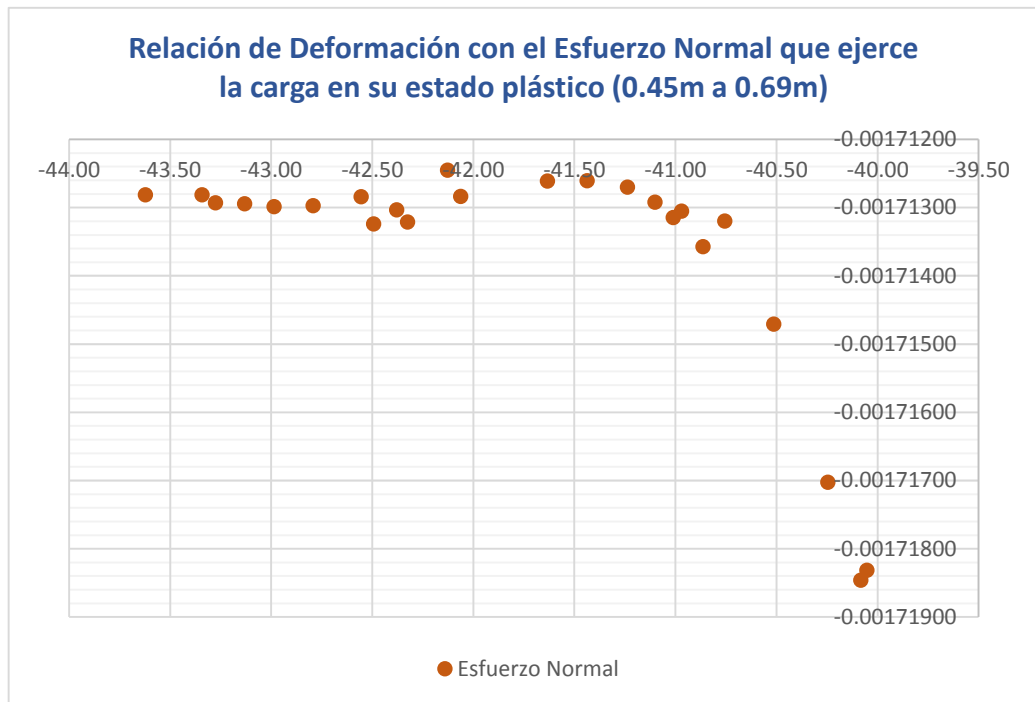
**Figura 124**

*Esfuerzo de Corte vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.45m-0.67m de profundidad de 40.27Kpa a 41.22Kpa, C-02.*



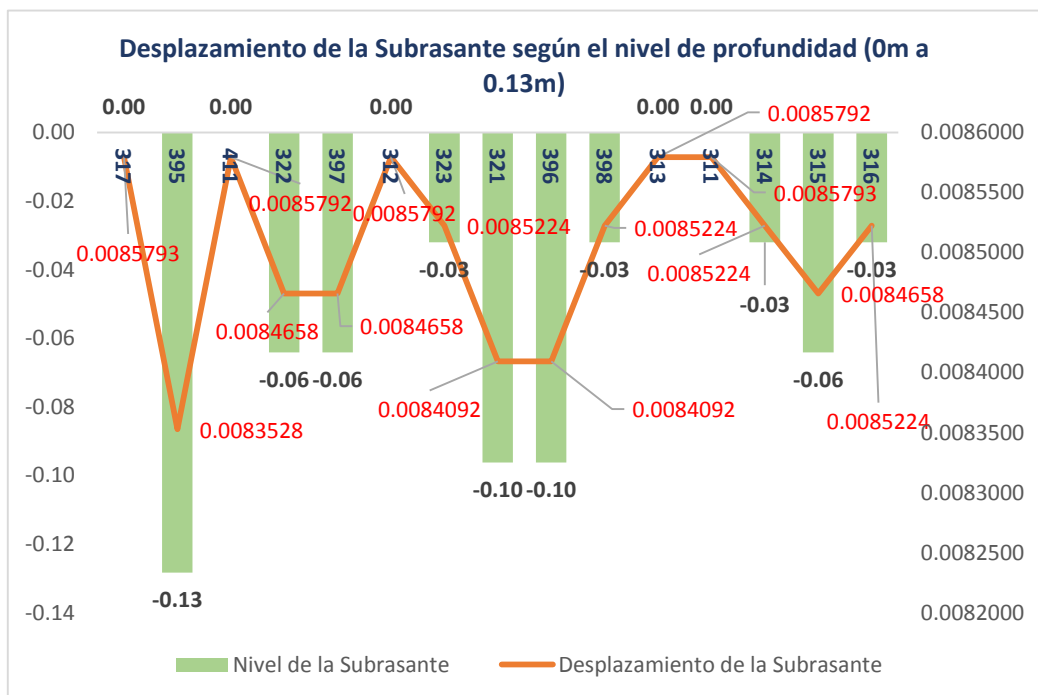
**Figura 125**

Esfuerzo Normal vs Deformación de la subrasante dentro de su estado plástico en el nivel de 0.45m-0.67m de profundidad de -40.08Kpa a -43.62Kpa, C-02.



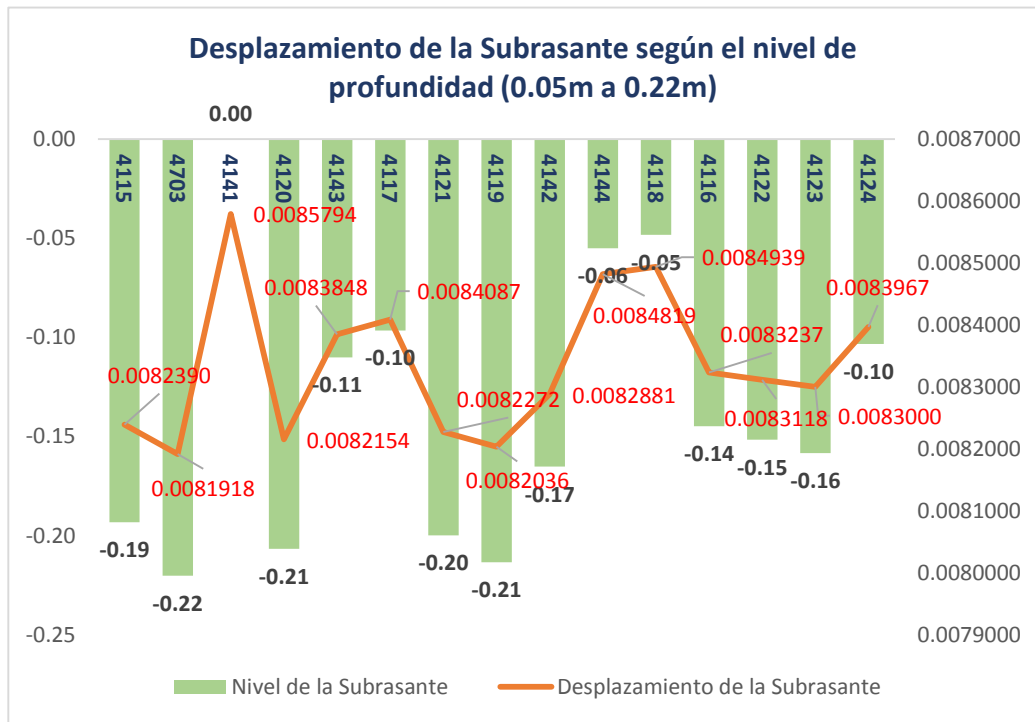
**Figura 126**

Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0m a 0.13m) con un desplazamiento entre 8.35mm - 8.58mm, C-02.



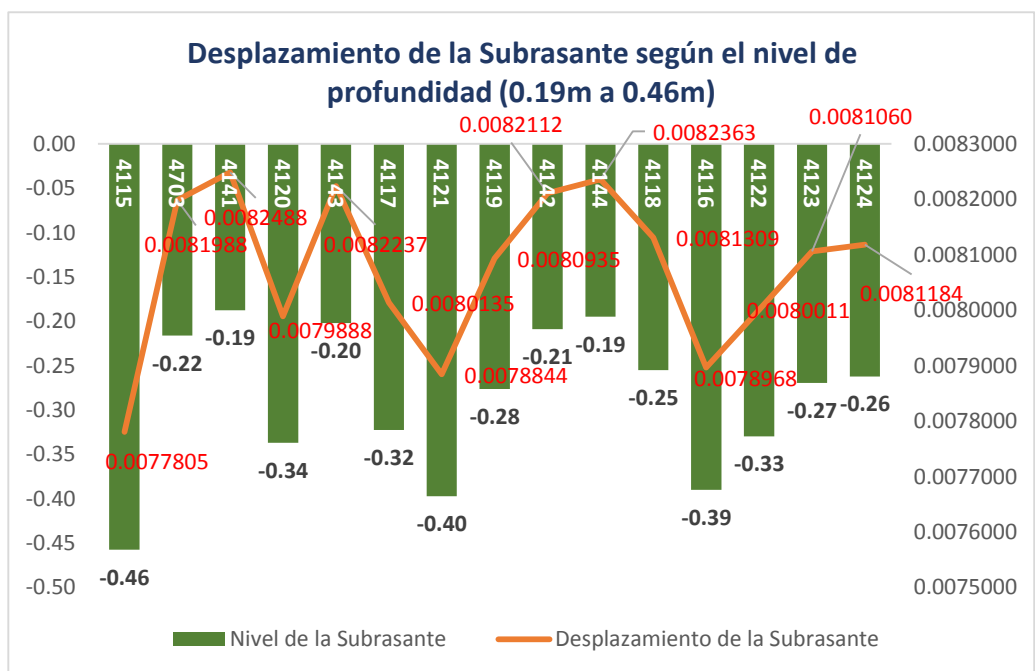
**Figura 127**

*Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0.05m a 0.22m) con un desplazamiento entre 8.19mm - 8.58mm, C-02.*



**Figura 128**

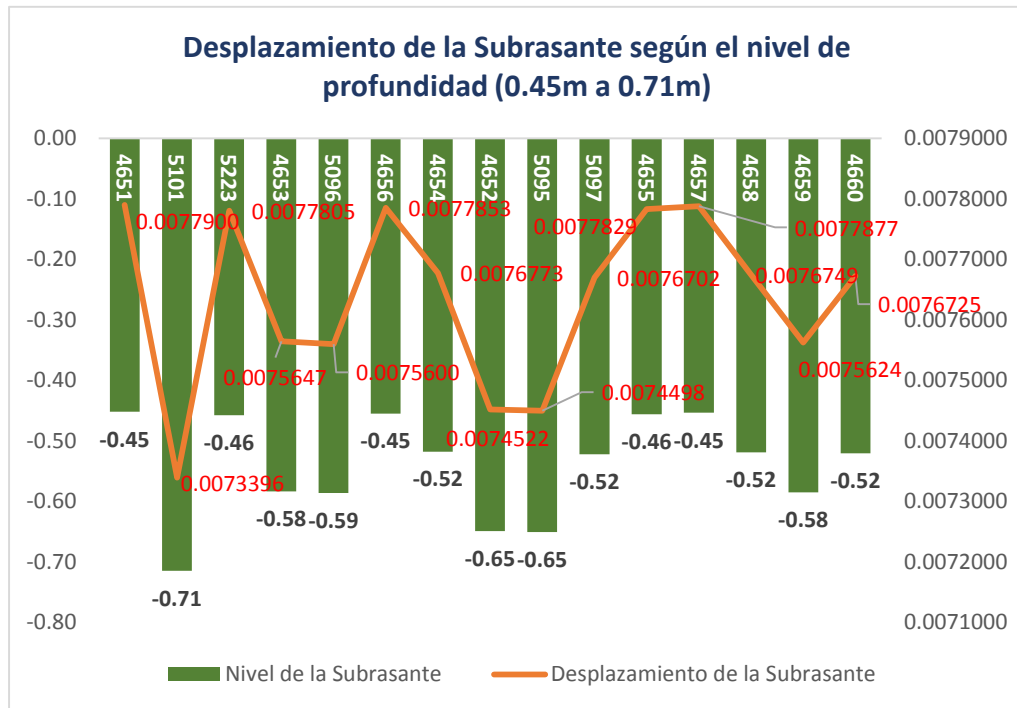
*Desplazamiento de la Subrasante en su estado plástico según la profundidad (0.34m a 0.61m) con un desplazamiento entre 7.78mm - 8.24mm, C-02.*





**Figura 129**

*Desplazamiento de la Subrasante en su estado elasto-plástico según la profundidad (0.45m a 0.71m) con un desplazamiento entre 7.34mm - 7.79mm, C-02.*



De acuerdo a los resultados obtenidos se resume el análisis de la muestra C-02, en la subrasante de la Progresiva 16+940:

- La muestra C-02 de subrasante tiene CBR de 8.71, considerado como regular y aceptable a la resistencia de las cargas de los vehículos que transitan sin considerar mejoramiento de subrasante como base de la infraestructura vial, equivale según la guía del ASHTOO 93 de diseño a 10,209 PSI ó 70.39Mpa de su módulo resiliencia de la subrasante que oscilan dichos valores en los cuadros estadísticos de la simulación.
- Es un tipo es suelo Limos y Arcillas (SUCS: CL) en ASHTOO: A-4 Suelos Limosos – 4, se clasifica como suelo fino considerado de regular a malo, teniendo en cuenta que el 60% de su granulometría es fino, pero no es un suelo expansivo verificando en sus ensayos de Proctor Modificado

de óptima humedad de 1.80 TN/m<sup>3</sup> y Máxima Densidad Seca de 10.65% y CBR.

- La subrasante tiene un peso específico de 1.88 TN/m<sup>3</sup> con 13.61% de contenido de humedad, a pesar de ello la cohesión y el suelo fino proporciona resistencia a las cargas vehiculares de forma regular a la distribución de cargas de cada capa que en el proceso constructivo según la demanda vehicular no necesariamente ha requerido de mejoramiento de subrasante.
- Tiene un Coeficiente Uniformidad 6 y Grado de Curvatura 1.50 donde indica que es un suelo bien gradado.
- La comparación del ensayo de corte directo con los datos de la simulación del Plaxis-2D varían de -16% a 20% entre la deformación tangencial y el esfuerzo de corte de 39.89kpa a 43.08kpa de la curva de relación.
- Con respecto a la deformación unitaria del suelo con respecto a la profundidad de la subrasante, en 0.50 metros existe una magnitud deformación de 0.001740, esto considerando el mayor entre la deformación tangencial y angular del suelo ante las cargas dinámicas de vehículos.
- La correlación que hay entre el esfuerzo de corte de 41.22kpa y el esfuerzo normal de 43.62kpa forma una curva de resistencia en su estado elástico hasta 0.001712 de deformación según los esfuerzos indicados donde culmina a un estado plástico hasta 0.69 metros de profundidad de la subrasante.
- Con respecto a la falla de deformación permanente del pavimento flexible, existe un desplazamiento máximo de 8.58 milímetros considerado como

falla estructural del pavimento flexible dentro de la simulación en el Plaxis-2D considerando en su estado plástico identificado con mayor distribución de las cargas a 0.50m en promedio de la subrasante, con un Módulo de Resiliencia de 89.1Mpa máximo y 63.6Mpa mínimo el cual tiene una correlación con el CBR con valores por encima de la subrasante donde podemos considerar el que las características mecánicas son aceptables para cumplir el periodo de vida de la infraestructura de 20 años evaluado en la muestra C-02.

- Se interpreta los resultados en que la subrasante de la muestra de suelo C-02 del pavimento flexible existente tiene una falla de deformación permanente de 8.58 milímetros al llegar a su estado plástico hasta 0.50m de profundidad de la subrasante, cumpliendo su serviciabilidad dentro de los parámetros dentro del periodo de vida útil de la infraestructura vial, donde se analiza que el problema vendría a ser la falla por fatiga o el problema de proceso constructivo de la carpeta asfáltica conllevando también a la caracterización del material donde se muestra deterioro de la vía de esta primera capa comprometiendo la base y subbases en algunas progresivas sobre todo en las precipitaciones.

#### **4.3. Prueba de Hipótesis**

Con los resultados obtenidos usaremos la estadística inferencial para realizar la prueba de la hipótesis de investigación y definir la regla de decisión según los resultados, para ello haremos uso del software estadístico SPSS y Jamovi, primero definimos la hipótesis específica, luego identificamos si los datos procesados siguen una curva de normalidad definiendo si son paramétricas

o no paramétricas (Shapiro Wilk), luego tratamos la prueba estadística con un nivel de significancia con el que trabajaremos con  $\alpha=0.05$  y con una confiabilidad de 95%, procesamos los datos para obtener la relación de las variables de forma comparativa comprobando nuestra hipótesis específica mediante la prueba de hipótesis que amerite, y finalmente describimos la regla de decisión y la conclusión de cada hipótesis específica.

#### **4.3.1. Prueba de Hipótesis Específica 1**

##### **a. Definición de Hipótesis Específica 1:**

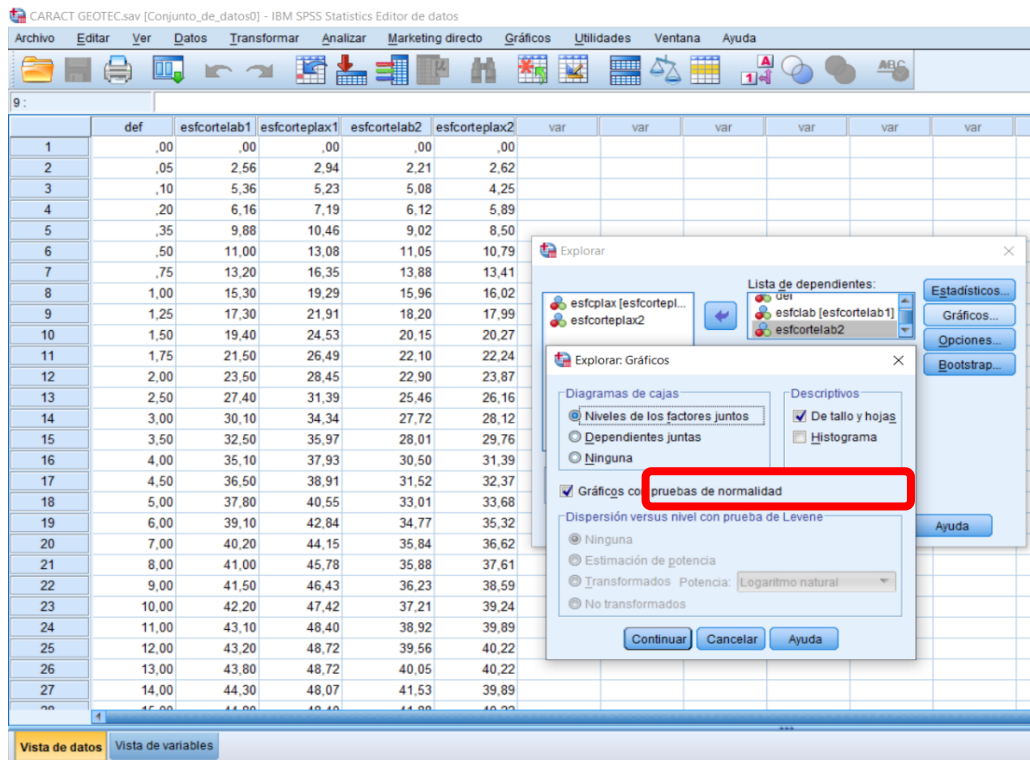
- ***HE1<sub>A</sub>***: Determinar las características geotécnicas permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
- ***HE1<sub>0</sub>***: Determinar las características geotécnicas no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

##### **b. Prueba de Distribución Normal:**

En primer lugar haremos la prueba de distribución normal de forma independiente a cada variable y luego de forma relacionada y comparativa para identificar si los valores de los indicadores tienen o no una distribución normal y definir si se trabajará con pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas, en este caso consideramos las variables deformación tangencial y esfuerzo de corte predominantes que indica la característica geomecánica de la subrasante que forma parte del ensayo de corte directo según los datos obtenidos en laboratorio según indica en la Tabla 23 y Figura 61 de la muestra C-01, Tabla 30 y Figura 67.

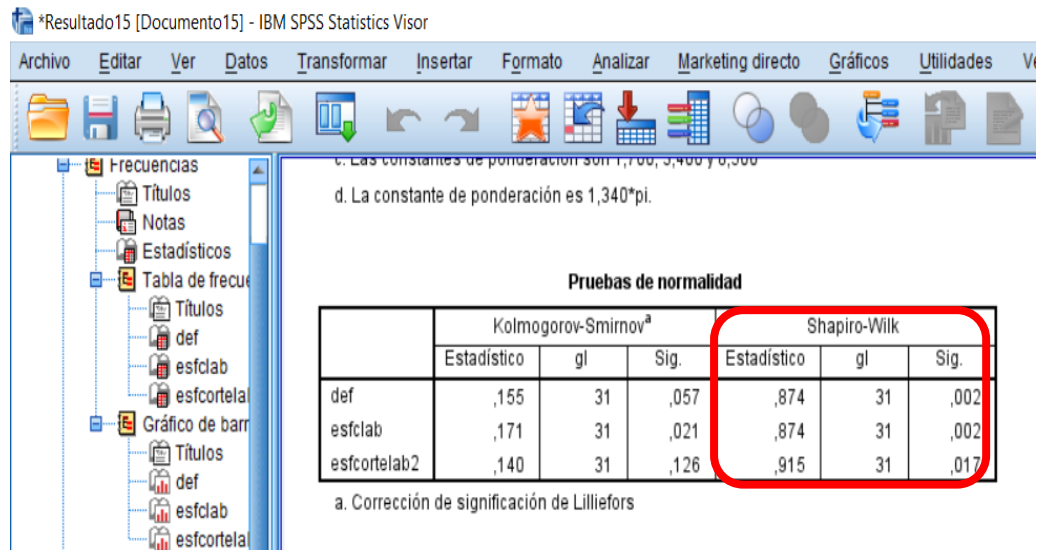
**Figura 130**

*Prueba de Normalidad con el Software SPSS para cada variable de forma independiente con análisis de forma descriptiva.*



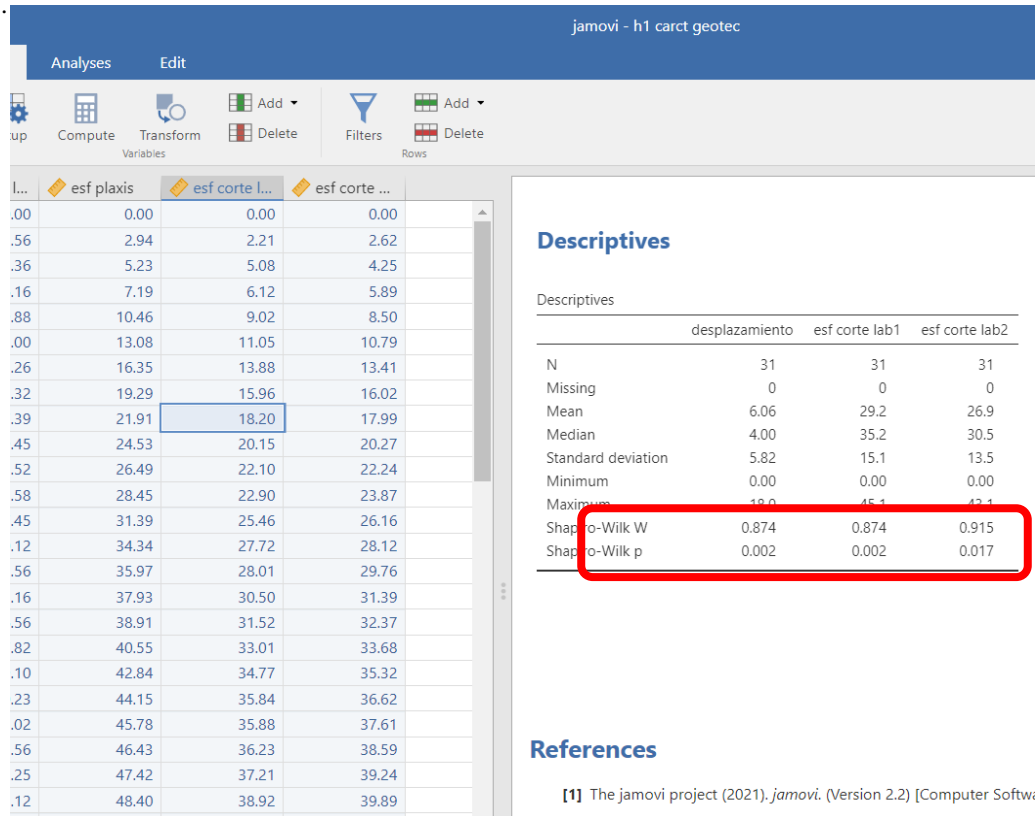
**Figura 131**

*Prueba de Normalidad de forma independiente de análisis descriptivo con el Software SPSS, donde cada variable tiene un valor de significancia (p-valor) mediante el método de Shapiro-Wilk.*



**Figura 132**

*Prueba de Normalidad con el Software Jamovi para cada variable de forma independiente con análisis de forma descriptiva, donde cada variable tiene un valor de significancia (p-valor) mediante el método de Shapiro-Wilk, detalla también información estadística descriptiva de las variables.*



Según los valores de prueba de normalidad, el p-valor de las variables: deformación tangencial (def) de 0.002, esfuerzo de corte C-01 (esfclab) con 0.002 y esfuerzo de corte C-02 (esfcortelab2) con 0.017 respectivamente, donde trabajamos con el valor de significancia  $\alpha = 0.05$  vemos que en las tres variables  $\alpha > p$ -valor, donde se traduce el rechazo de la prueba de distribución normal o de no efecto (prueba paramétrica), aceptando la prueba no paramétrica, realizado en el software mediante el método de Shapiro-Wilk, tanto en el software SPSS y Jamovi, donde en ambos aplicativos los valores de p-valor son iguales.

### c. Prueba de la Hipótesis:

Según lo indicado se realizará la prueba de hipótesis con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y una confiabilidad de 95%, con una prueba estadística no paramétrica y se procesará en tanto en el software SPSS y Jamovi mediante el método Wilcoxon que evaluará el nivel de asociación de variables de alcance comparativo.

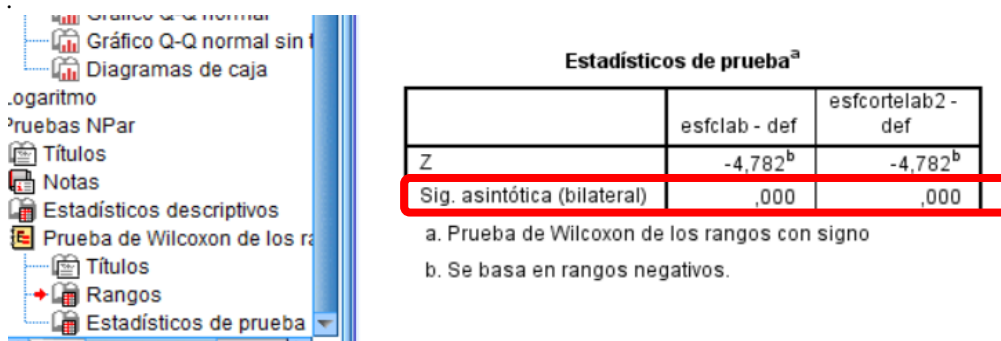
**Figura 133**

*Prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el tipo de prueba Wilcoxon con el Software SPSS.*



**Figura 134**

*Resultado de prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el tipo de prueba Wilcoxon con el Software SPSS, con p-valor=0.000*



**Figura 135**

Resultado de prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el tipo de prueba Wilcoxon con el Software Jamovi, con  $p\text{-valor} < 0.001$ , y prueba de normalidad Shapiro Wilk con  $p\text{-valor} < 0.001$ .

jamovi - h1 carct geotec

	N	Mean	Median	SD	SE
desplazamiento	31	6.06	4.00	5.82	1.05
esf corte lab1	31	29.16	35.16	15.10	2.71
desplazamiento	31	6.06	4.00	5.82	1.05
esf corte lab2	31	26.89	30.50	13.47	2.42

**Paired Samples T-Test**

Paired Samples T-Test

			Statistic	p
desplazamiento	esf corte lab1	Wilcoxon W	0.00*	<.001
	esf corte lab2	Wilcoxon W	0.00*	<.001

\* 1 pair(s) of values were tied

Normality Test (Shapiro-Wilk)

		W	p
desplazamiento	- esf corte lab1	0.843	<.001
desplazamiento	- esf corte lab2	0.806	<.001

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Según el resultado de prueba de hipótesis no paramétrica mediante el tipo de prueba Wilcoxon, tanto en el software SPSS y Jamovi los resultados son iguales, donde  $p\text{-valor} < 0.001$  con  $N=31$ , en Jamovi indica la prueba de normalidad Shapiro Wilk para la asociación de variables con  $p\text{-valor} < 0.001$  siendo  $\alpha(0.05) > p\text{-valor}(0.000)$ .



#### **d. Regla de decisión y conclusión**

Con  $\alpha=0.05$  y  $p\text{-valor}<0.001$  ó  $p\text{-valor}=0.000$  entonces  $\alpha (0.05) > p\text{-valor} (0.000)$ , entonces la Hipótesis Específica Nula 1 **HE1<sub>0</sub> se rechaza**, y la Hipótesis Específica Alternativa **HE1<sub>A</sub> se acepta**. Por lo cual decimos que: Determinar las características geotécnicas permite evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

#### **4.3.2. Prueba de Hipótesis Específica 2**

##### **a. Definición de Hipótesis Especifica 2:**

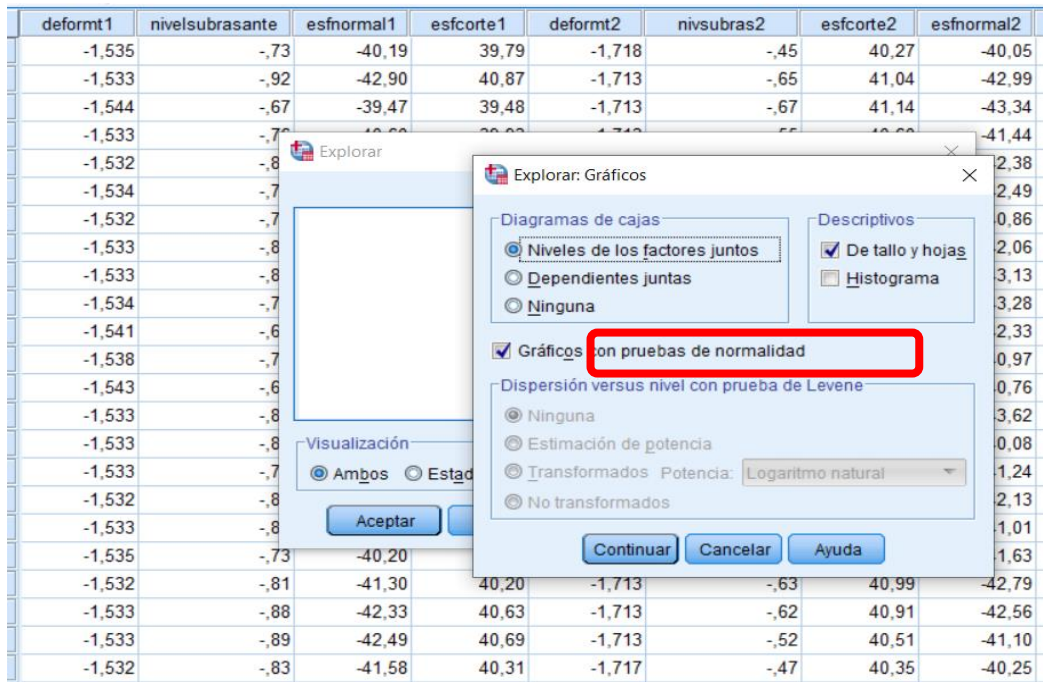
- **HE2<sub>A</sub>**: Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
- **HE2<sub>0</sub>**: Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

##### **b. Prueba de Distribución Normal:**

Realizamos la prueba de distribución normal de forma independiente a cada variable y luego de forma relacionada y comparativa para identificar si los valores de las variables tienen o no una distribución normal para definir las pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas, en este caso consideramos las variables deformación tangencial, nivel de profundidad de la subrasante, esfuerzo de corte y esfuerzo normal de la muestra C-01 y C-02 en total 8 variables en 6 pares de asociación, valores predominantes resumidas que resultan del análisis en el software Plaxis 2-D en su estado plástico de la subrasante según indica desde la Figura 83 hasta la Figura 93 y desde la Tabla 35 hasta la Tabla 38.

**Figura 136**

*Prueba de Normalidad con el Software SPSS para cada indicador de forma independiente con análisis de forma descriptiva.*



**Figura 137**

*Prueba de Normalidad de forma independiente de análisis descriptivo con el Software SPSS, donde cada indicador tiene un valor de significancia (p-valor) mediante el método de Shapiro-Wilk.*

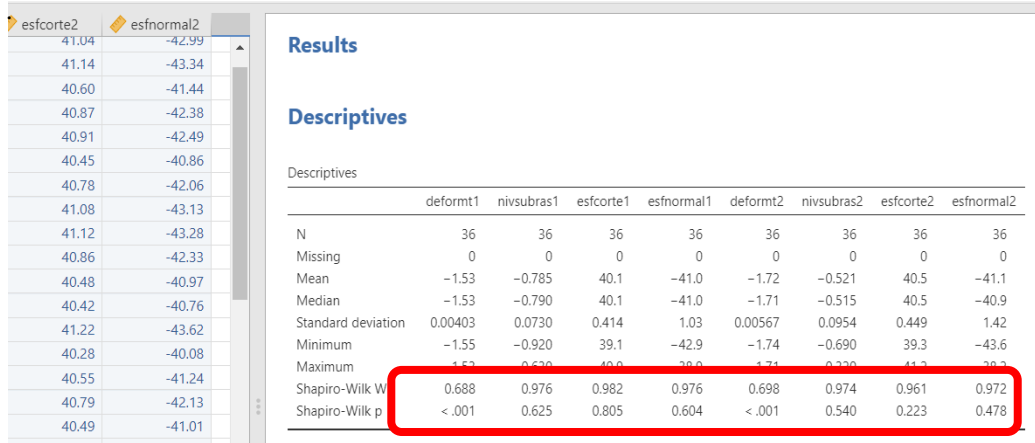
**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
deformt1	,296	36	,000	,692	36	,000
nivelsubrasante	,099	36	,200*	,976	36	,625
esfnormal1	,083	36	,200*	,976	36	,604
esfcorte1	,081	36	,200*	,982	36	,805
deformt2	,284	36	,000	,698	36	,000
nivsubras2	,098	36	,200*	,974	36	,540
esfcorte2	,094	36	,200*	,961	36	,223
esfnormal2	,087	36	,200*	,972	36	,478

\*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.  
a. Corrección de significación de Lilliefors

**Figura 138**

*Prueba de Normalidad con el Software Jamovi para cada variable de forma independiente con análisis de forma descriptiva, donde cada indicador tiene un valor de significancia (p-valor) mediante el método de Shapiro-Wilk.*

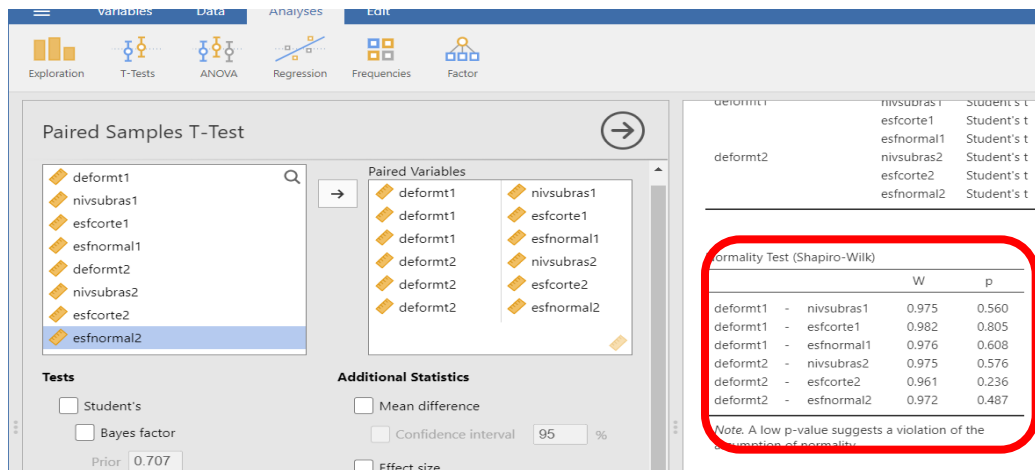


Según los valores de prueba de normalidad, el p-valor de todas las variables son mayores al valor de significancia  $\alpha = 0.05$ , es decir  $p\text{-valor} > \alpha$ , a excepción de las variables deformación tangencial 1 y deformación tangencial 2 (con valores 0.000) que se relacionan las tres variables en cada muestra, donde en este caso ocurre lo contrario:  $\alpha > p\text{-valor}$ .

Para poder definir la prueba de normalidad evaluamos en el Software Jamovi las variables de forma relacionada:

**Figura 139**

*Prueba de Normalidad con el Software Jamovi con la variable relacionada de cada muestra mediante el método de Shapiro-Wilk.*



Respecto a esta prueba de normalidad con variables relacionadas de los 6 pares de la muestra C-01 y C-02, observamos que el  $p\text{-valor} > \alpha$ , es decir el  $p\text{-valor}$  supera el nivel de significancia 0.05 donde con este resultado se acepta la prueba de distribución normal o de no efecto (prueba paramétrica), y se rechaza la prueba no paramétrica.

### c. Prueba de la Hipótesis:

Según lo indicado se realizará la prueba de hipótesis con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y una confiabilidad de 95%, con una prueba estadística paramétrica de t-student y tanto en el software SPSS y Jamovi se evaluará el nivel de asociación de variables de alcance comparativo.

**Figura 140**

*Prueba de Hipótesis paramétrica t-student con el Software SPSS.*



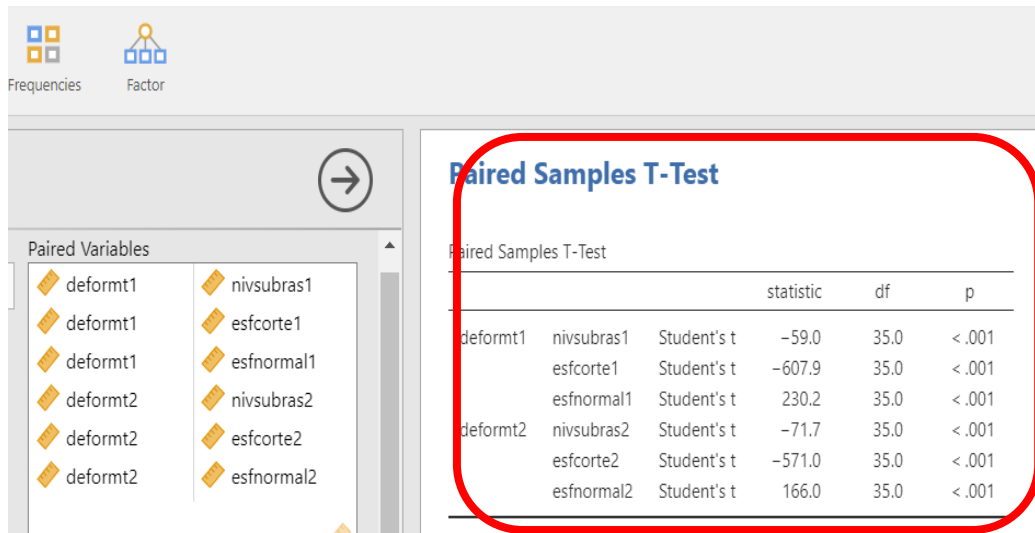
**Figura 141**

*Resultado de prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el tipo de prueba t-student con el Software SPSS, con  $p\text{-valor}=0.000$ .*

		Prueba de muestras emparejadas							
		Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bilateral)
		Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
Inferior	Superior								
Par 1	deformt1 - nivelsubrasante	-,749747	,076360	,012727	-,775583	-,723910	-58,911	35	,000
Par 2	deformt1 - esfcorte1	-41,626413	,410719	,068453	-41,765380	-41,487446	-608,101	35	,000
Par 3	deformt1 - esfnormal1	39,462753	1,028857	,171476	39,114638	39,810869	230,135	35	,000
Par 4	deformt2 - nivsubras2	-1,195333	,100065	,016678	-1,229191	-1,161476	-71,673	35	,000
Par 5	deformt2 - esfcorte2	-42,207000	,443537	,073923	-42,357071	-42,056929	-570,960	35	,000
Par 6	nivsubras2 - esfnormal2	40,56694	1,32326	,22054	40,11922	41,01467	183,940	35	,000

**Figura 142**

Resultado de prueba de Hipótesis paramétrica t-student con el Software Jamovi, con p-valor<0.001, y prueba de normalidad Shapiro Wilk con p-valor<0.001.



The screenshot shows the Jamovi software interface. On the left, under 'Paired Variables', there are two columns of variables: deformt1, deformt2 and nivsubras1, nivsubras2; esfcorte1, esfcorte2; esfnormal1, esfnormal2. On the right, a 'Paired Samples T-Test' table is displayed, which is highlighted with a red rounded rectangle. The table has columns for 'statistic', 'df', and 'p'.

			statistic	df	p
deformt1	nivsubras1	Student's t	-59.0	35.0	< .001
	esfcorte1	Student's t	-607.9	35.0	< .001
	esfnormal1	Student's t	230.2	35.0	< .001
deformt2	nivsubras2	Student's t	-71.7	35.0	< .001
	esfcorte2	Student's t	-571.0	35.0	< .001
	esfnormal2	Student's t	166.0	35.0	< .001

Según el resultado de prueba de hipótesis paramétrica t-student, tanto en el software SPSS y Jamovi los resultados son iguales, donde p-valor<0.001 con grado de libertad gl=35, donde en el valor t de la normalidad varía en centésimas entre ambas aplicaciones estadísticas considerando más didáctico en Jamovi:  $t_1 = -59.0; -607.9; 230.2$  y  $t_2 = -71.7; -571.0; 166.0$  respectivamente, indicando una asociación de variables de p-valor<0.001 o p-valor=0.000, siendo  $\alpha(0.05) > p\text{-valor}(0.000)$ .

#### **d. Regla de decisión y conclusión**

Con  $\alpha=0.05$  y p-valor<0.001 ó p-valor=0.000 entonces  $\alpha(0.05) > p\text{-valor}(0.000)$ , entonces la Hipótesis Específica Nula 1 **HE2<sub>0</sub> se rechaza**, y la Hipótesis Específica Alternativa **HE2<sub>A</sub> se acepta**. Por lo cual decimos que: Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permite evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

### 4.3.3. Prueba de Hipótesis Específica 3

#### a. Hipótesis Especifica 3:

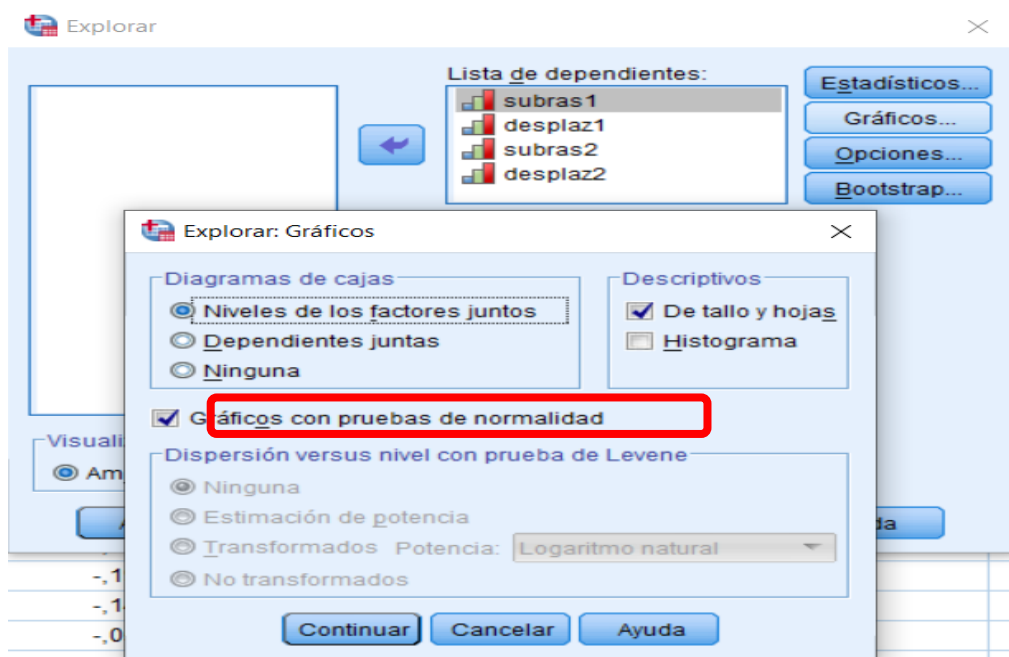
- $HE3_A$ : Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
- $HE3_0$ : Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

#### b. Prueba de Distribución Normal:

Realizamos la prueba de distribución normal de forma independiente de cada variable y de forma relacionada y comparativa para identificar la prueba de distribución normal y definir las pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas, en este caso consideramos las variables desplazamiento y nivel de profundidad de la subrasante de la muestra C-01 y C-02, en total 4 variables en 2 pares de asociación, valores predominantes resumidas que resultan del análisis en el software Plaxis 2-D describiendo el desplazamiento de la subrasante al perder sus propiedades físicas y mecánicas según indica desde la Figura 94 hasta la Figura 97 para la muestra C-01 y desde la Figura 124 hasta la figuras 127 para la muestra C-02.

**Figura 143**

*Prueba de Normalidad con el Software SPSS para cada indicador de forma independiente con análisis de forma descriptiva.*



**Figura 144**

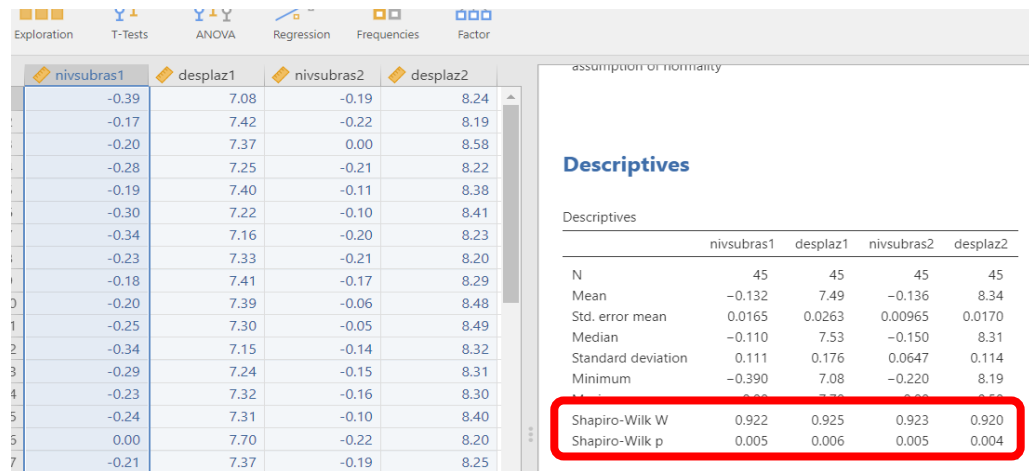
*Prueba de Normalidad de forma independiente de análisis descriptivo con el Software SPSS, donde cada indicador tiene un valor de significancia (p-valor) mediante el método de Shapiro-Wilk.*

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
subras1	,170	45	,002	,922	45	,005
desplaz1	,156	45	,008	,925	45	,006
subras2	,131	45	,050	,923	45	,005
desplaz2	,143	45	,022	,920	45	,004

a. Corrección de significación de Lilliefors

**Figura 145**

*Prueba de Normalidad con el Software Jamovi para cada variable de forma independiente, donde con un valor de significancia (p-valor) mediante el método de Shapiro-Wilk.*



Según los valores de prueba de normalidad, el p-valor de todas las variables son menores al valor de significancia  $\alpha = 0.05$ , es decir  $\alpha > p$ -valor, es decir se rechaza la prueba estadística de normalidad o prueba paramétrica y se acepta la prueba no paramétrica de la Hipótesis Específica 3.

**c. Prueba de la Hipótesis:**

Según lo indicado se realizará la prueba de hipótesis con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y una confiabilidad de 95%, con una prueba estadística no paramétrica de wicolxon y se procesará en tanto en el software SPSS y Jamovi que evaluará el nivel de asociación de variables de alcance comparativo.

**Figura 146**

*Prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el método Wilcoxon con el Software SPSS.*





**Figura 147**

Resultado de prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el tipo de prueba Wilcoxon con el Software SPSS, con  $p\text{-valor}=0.000$ .

**Estadísticos de prueba<sup>a</sup>**

	subras1 - desplaz1	subras2 - desplaz2
Z	-5,851 <sup>b</sup>	-5,851 <sup>b</sup>
Sig. asintótica (bilateral)	,000	,000

a. Prueba de Wilcoxon de los rangos con signo  
b. Se basa en rangos positivos.

**Figura 148**

Resultado de prueba de Hipótesis no paramétrica mediante el método Wilcoxon con el Software Jamovi, con  $p\text{-valor}<0.001$ , y prueba de normalidad Shapiro Wilk con  $p\text{-valor}$  0.010 y 0.003 respectivamente a cada par de variables de asociación.

**Paired Samples T-Test**

Paired Samples T-Test		Statistic	p	
desplaz1	nivsubras1	Wilcoxon W	1035	< .001
desplaz2	nivsubras2	Wilcoxon W	1035	< .001

Normality Test (Shapiro-Wilk)

	W	p
desplaz1 - nivsubras1	0.930	0.010
desplaz2 - nivsubras2	0.917	0.003

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

Según el resultado de prueba de hipótesis no paramétrica con el método Wilcoxon tanto en el software SPSS y Jamovi los resultados son iguales, donde al indicar una asociación de variables, el resultado de  $p\text{-valor}<0.001$  o  $p\text{-valor}=0.000$ , siendo  $\alpha(0.05)>p\text{-valor}(0.000)$ , además muestra la prueba de normalidad (Shapiro Wilk) con la relación de dos variables de forma comparativa con  $p\text{-valor}$  0.010 y 0.003 siendo ambos valores menor a  $\alpha(0.05)$ , contrastando la prueba de hipótesis no paramétrica.

#### **d. Regla de decisión y conclusión**

Con  $\alpha=0.05$  y  $p\text{-valor}<0.001$  ó  $p\text{-valor}=0.000$  entonces  $\alpha (0.05) > p\text{-valor} (0.000)$ , entonces la Hipótesis Específica Nula 1 **HE3<sub>0</sub>** se **rechaza**, y la Hipótesis Específica Alternativa **HE3<sub>A</sub>** se **acepta**. Por lo cual decimos que: Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permite evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

#### **4.4. Discusión de resultados**

1. Según el análisis de resultados de la prueba de hipótesis específica 1, la subrasante evaluada muestra una resistencia regular, es un tipo de suelo fino con un tipo de suelo Limo Arcilloso (SUCS: ML) en ASHTOO: A-7-5 Suelos arcillosos – 11 y suelo Limos y Arcillas (SUCS: CL) en ASHTOO: A-4 Suelos Limosos – 4 de cada muestra respectivamente, con características físicas regulares que se comporte en un estado elástico dentro de su periodo de vida útil y sus características mecánicas que varían de - 16% a 20% entre la deformación tangencial y el esfuerzo de corte mínimo de 39.89kpa y máximo de 48kpa de la curva de relación y no necesariamente pueda realizarse una estabilización especial de suelo para conformar la subrasante, el cual cumplen la regla de asociación de las variables evaluadas y según la prueba de estadística no paramétrica de Wilcoxon se rechaza la hipótesis específica nula 1 y se acepta la hipótesis específica alternativa 1 donde determinar las características geotécnicas permite evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

2. Con respecto análisis de resultados de la prueba de hipótesis específica 2, existe una relación de asociación de las variables de deformación tangencial con el nivel de subrasante, esfuerzo de corte y esfuerzo normal de ambas muestras, y generan deformaciones de 0.001638 y 0.001712 en su estado elástico a 0.92 y en 0.69m identificado en la simulación del Plaxis-2D que relaciona a la falla de deformación permanente durante su vida útil del pavimento flexible, con el módulo de resiliencia de la subrasante mínima de 63.6Mpa y máxima de 92.5Mpa de la subrasante que ofrece resistencia a las cargas dinámicas de los vehículos, donde cumple con la serviciabilidad correspondiente a la falla de deformación permanente dentro de los parámetros dentro del periodo de vida útil de la infraestructura vial, donde se analiza que la mayor incidencia de deformaciones plásticas se da desde 0.50m hasta 0.80m, a mayor profundidad se dan las distribuciones de carga donde es importante la rigidez del material de las capas del pavimento flexible , y según la prueba de hipótesis paramétrica de t-student realizada cumple la regla de asociación de las variables evaluadas donde se rechaza la hipótesis específica nula 2 y se acepta la hipótesis específica alternativa 2 por lo cual decimos que: Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permite evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.
  
3. Según el análisis de resultados de la prueba de hipótesis específica 3, se evaluó el desplazamiento de la subrasante según niveles de profundidad de la subrasante ante las esfuerzos ocasionados por las cargas vehiculares tangencial con el nivel de subrasante, donde el comportamiento hasta su

estado plástico de la subrasante es de 0.80m y 0.50m de profundidad respectivamente con deformaciones de 0.001533 y 0.001740 y con un desplazamiento de 7.8 mm y 8.58 mm respectivamente en una magnitud de deformaciones de 0.001533 y 0.001740 en la simulación del Plaxis-2D que relaciona a la falla de deformación permanente durante su vida útil del pavimento flexible, donde se analiza que mediante el Método de Elementos finitos se pudo comparar, y detallar de forma minuciosa el comportamiento estructural de la subrasante, según estos parámetros el tiempo de vida útil del pavimento flexible es aceptable planificado mantenimientos de la carpeta asfáltica, a causa por las fisuras, piel de cocodrilo y grietas considerables genera de forma continua la falla por fatiga o por un problema de proceso constructivo de la carpeta asfáltica, caracterización del material donde se muestra deterioro de la vía de esta primera capa comprometiendo la base y subbases y por filtraciones por las precipitaciones va perdiendo resistencia la capa de la base y subbase donde ya requiere reponerlo la sección dañada, y según la prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon realizada cumple la regla de asociación de las variables evaluadas donde se rechaza la hipótesis específica nula 3 y se acepta la hipótesis específica alternativa 3 por lo cual decimos que: Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permite evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.

## CONCLUSIONES

Habiendo interpretado los resultados al hacer la prueba de hipótesis se llega a las siguientes conclusiones:

1. Existe una relación de variables de forma comparativa entre la deformación tangencial y el esfuerzo de corte de acuerdo al tipo de suelo fino de las dos muestras, las características físicas y mecánicas son regulares para conformar de forma estable la subrasante proporcionando resistencia, cohesión y aportando el efecto trabazón para proporcionar una rigidez aceptable como base de cimentación de la infraestructura vial, sin someter a un tratamiento especial de estabilización del suelo de fundación, también se indica que no sigue una curva de normalidad de los datos en la prueba de hipótesis ya que tanto en el ensayo de laboratorio de corte directo y en la simulación se comporta gráficamente de forma no lineal conformando una curva al someter a esfuerzos de corte y normal donde llega a un estado límite de plasticidad, es por ello para realizar la prueba de la hipótesis específica 1 se trabajó con la prueba no paramétrica de Wilcoxon determinando que las características geotécnicas si nos permiten evaluar la subrasante.
2. Con respecto a los resultados evaluados en la simulación con el software PLAXIS-2D se realizó el análisis con una serie de datos el cual mediante el Método de Elementos finitos se consolidaron en 8 variables para la prueba de hipótesis específica 2, donde se analizó relacionando la variable deformación de cada muestra con las variables de esfuerzo de corte, esfuerzo normal y nivel de la subrasante, de esta forma se evaluó

3. el comportamiento elastoplástico de la subrasante por nivel de profundidad determinando hasta qué niveles según las cargas vehiculares ejercidas en la subrasante pierde sus propiedades físicas y mecánicas dentro del tiempo de vida útil del pavimento flexible, y las distribuciones de esfuerzos es de menor incidencia a mayor profundidad, para la prueba de hipótesis se agrupo 6 pares de variables según la asociación de forma comparativa según la prueba de hipótesis paramétrica de t-student donde se indica que se puede evaluar la subrasante con la representación realizada.
  
4. De acuerdo al modelo constitutivo de Mohr-Coulomb para la subrasante se configuró en la simulación con el software PLAXIS-2D, que conlleva a la comparación del ensayo en laboratorio de corte directo y la simulación realizada, ya que es un tipo de suelo fino pero con características aceptables para conformar la subrasante, se generaron mallas como partes de elementos geométricos triangulares, cada uno con 15 nodos, una vez procesado la información con sus parámetros de entrada se obtuvo una gran cantidad de información de la subrasante evaluando su estado elastoplástico, concluyendo que entre 0.80m y 0.50m existen puntos de falla en estado plástico con un desplazamiento de 7.8 mm y 8.58 mm respectivamente con fallas de deformación permanente durante su vida útil del pavimento flexible, ello conlleva a que a más profundidad disminuye la deformación y desplazamiento de la subrasante, posterior a ello mantiene su estado elástico y existe mejor distribución de los esfuerzos, se realizó la prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon realizada que cumple la regla de asociación de las variables donde indica que se puede evaluar la subrasante estimando el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos.

## RECOMENDACIONES

1. Ante el proceso de la información de las características de la subrasante tanto en los ensayos de laboratorio y la simulación realizada, es recomendable evaluar el comportamiento real del suelo para conformar la subrasante ya que en este caso el tipo de suelo fino no son expansivos, de lo contrario se considera un mayor costo en poder estabilizar la subrasante para evitar la humedad ya que en la zona los suelos son húmedos por la cantidad de ojos de agua encontrados y ríos y pequeñas lagunas existentes, también hacer un análisis el tipo de suelo para evitar problemas posteriores en el proceso constructivo y, también conformar la subrasante con granulometrías no mayor a 3 pulgadas ya que valores mayores para conformar el suelo de fundación no permite un efecto trabazón efectivo y una consolidación a corto plazo de manera desfavorable, en nuestro caso como tipo de suelo fino es el uso de partículas angulares en las capas.
2. Correspondiente a las deformaciones de la subrasante donde la mayor incidencia de deformaciones plásticas se da desde 0.50m hasta 0.80m, se debe priorizar la rigidez y la mejor caracterización de los materiales en el proceso constructivo ya que la distribución de cargas en las capas de la infraestructura vial se transfiere de capa en capa donde es importante evaluarlo en el primer metro de profundidad desde la carpeta asfáltica, ya partir de la subrasante incide en 0.50m desde la subrasante, ya que los esfuerzos normales y de corte hacen que paulatinamente falle por deformación permanente por la carga de los vehículos afectando también la uniformidad del material de cada capa.

3. De acuerdo a la simulación según los cálculos usando el Método de los Elementos Finitos, los desplazamientos entre 7.8 mm y 8.58 mm de la subrasante se refiere a los puntos de falla en su estado plástico, donde dentro de su vida útil del pavimento flexible es mínima la falla de deformación permanente, ante ello el deterioro de la carpeta asfáltica es a causa de problemas de la mala caracterización del material, o un mal proceso constructivo donde actualmente lo están parchando, el cual se recomienda cambiar por secciones las capas de base y sub base afectadas para recuperar el nivel de serviciabilidad de la vía ya que por las infiltraciones por las precipitaciones se encuentra comprometidos de gran consideración a efecto existen baches profundos y fisuras considerables.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrea, L. R. (2019). *ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-SOSTENIMIENTO PARA TUNELES CIRCULARES MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS*. Arequipa: Tesis Pregrado.
- Braja. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: OVA.
- Catalán Pere Prat, A. L. (2015). *Estudio Experimental y Análisis Numérico de la Desecación en Suelos Arcillosos*. Barcelona: Tesis Doctorado.
- Celigüeta, J. (2011). *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. San Sebastián España: UNICOPIA C.B.
- DG-2018:MTC. (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018*. Lima.
- Esquela, H. (2005). *Aplicación del Método de los Elementos Finitos en la Simulación de Cimentaciones Superficiales*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- Gere, J. (2002). *Timoshenko, Resistencia de Materiales*.
- Gobierno Regional de Pasco. (2017, 2022). *Mejoramiento de la Carretera Yanahuanca-Cerro de Pasco*. Cerro de Pasco: Sub Gerencia de Estudios.
- Herman, A. B. (2015). *MODELAJE GEOTÉCNICO POR ELEMENTOS FINITOS Y COMPOBACIÓN INSTRUMENTAL DE LA EXACTITUD LOGRADA*. Cali: Tesis Pregrado.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación, Sexta Edición*. México: Interamericana.

- Herrera Montealegre, M. (2014). *Determinacion del Modulo Resiliente de diseño de pavimentos Ashtoo 93 y 2002*. Piura: Universidad de Piura.
- Játiva, J., Constante, G., & Cabrera, G. (2014). *Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- Juarez, E., & Rico, A. (1973). *Fundamento de la Mecánica de Suelos Tomo I*. México: LIMUSA SA.
- Kotronis, P., & Collins, frederick. (2006). *Implementation of path following techniques into the finite element code LAGAMINE*. Liege, Grenoble.
- Malvern, L. (1969). *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. New Jersey: Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs.
- MEF. (2022). *Ministerio de Economía y Finanzas*. Lima.
- Miranda Narvaez, F. M., & Sánchez Quintero, E. A. (2015). *EVALUACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE Y DEFORMACIÓN PERMANENTE DE UNA BASE GRANULAR MECANICAMENTE ESTABILIZADA CON GEOMALLA*. Quito: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
- MTC. (2013). *Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos*. Lima.

MTC. (2017). *Manual de Ensayo de Materiales*. Lima: Direccion General de Caminos y Ferrocarriles.

MTC. (2017). *MAPA VIAL PASCO, HOJA VIAL*. LIMA: Direccion General de caminos y Ferrocarriles.

Oñate, E. (1995). *Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos – Análisis estático lineal*. Barcelona.

Ramos Guerra, C. C. (2014). *“EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN EL MODULO RESILIENTE EN MEZCLAS ASFALTICAS DISEÑADAS POR EL METODO MARSHALL EN LA CIUDAD DE AREQUIPA*. Arequipa: UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA.

TARDEO DE LA CRUZ Cesar Augusto, Z. P. (2016). *ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES POR ELEMENTOS FINITOS EN LA ZONA DE HUAYLLAPAMPA DEL DISTRITO DE CUENCA - HUANCVELICA*. Huancavelica: Tesis PreGrado.

Varese, P. U. (2018). *Análisis Dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los Taludes de la Costa Verde en el Distrito de Miraflores*. Lima: Tesis Pregrado.

Wellington, C. (2018). *Metodo de Aproximacion por Métodos Numéricos*.

## ANEXOS

### ANEXO 01 MATRIZ DE CONSISTENCIA

DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA	FORMULACION DEL PROBLEMA	FORMULACION DE OBJETIVOS	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	SUB DIMENSIONES	INDICADORES	POBLACION MUESTRA Y UM	METODOLOGÍA
<b>SINTOMAS:</b>	<b>PROBLEMA GENERAL:</b>	<b>OBJETIVO GENERAL:</b>	<b>HIPOTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>				<b>POBLACION:</b>	<b>ENFOQUE / PARADIGMA:</b>
No se determina eficientemente el comportamiento físico-mecánico de la subrasante por aplicar una metodología convencional  No se obtiene información correcta físico- mecánico del suelo y se aplica un método para el diseño del pavimento flexible.	¿En qué medida la aplicación de métodos de elementos finitos ayudará a evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021?	Aplicar el método de elementos finitos para evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.	HGA: La aplicación de método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.  HGO: La aplicación de método de elementos finitos no permitirá evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.	Métodos de Elementos Finitos	D1 VI: Características Geotécnicas	Propiedades Físicas y Mecánicas	Límite líquido Límite plástico Índice de plasticidad Granulometría Peso Específico % Humedad Natural Clasificación de Suelo CBR 95% Humedad Óptima de Compactación Mejor Densidad de Suelo Ángulo de fricción interna Cohesión	Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco.	Cuantitativo / Positivista
D2 VI: Modelos Constitutivos	Modelo Mohr-Coulomb	Ángulo de fricción interna Cohesión Deformación Tangencial Esfuerzo de Corte Esfuerzo Normal							
D3 VI: Comportamiento Elastoplástico	Método de elementos finitos	Módulo de Resiliencia Módulo de Young Coeficiente de Poisson Coeficiente de Permeabilidad Esfuerzo Principal Esfuerzo Desviador Esfuerzo de Corte Esfuerzo Normal	<b>MUESTRA:</b> Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco. 2 calicatas:  Tramo I 1. Progresiva 09+760 2. Progresiva 16+940			<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN:</b> Aplicado			
<b>CONTROL DE PRONOSTICO</b>	<b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS.</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECIFICAS.</b>	<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>					
Determinar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos para evaluar la subrasante.	1. ¿La determinación de la característica geotécnica mediante ensayos en campo y en laboratorio permitirá evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco, 2021?	1. Determinar la característica geotécnica mediante ensayos en campo y en laboratorio para evaluar la subrasante de la carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1:</b> <b>HE1A:</b> Determinar las características geotécnicas permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.: Determinar las	Subrasante			Desplazamiento Deformación Tangencial Deformación Angular Nivel de profundidad de subrasante Nodos Elementos de Mallas		<b>NIVEL DE INVESTIGACIÓN:</b> Correlacional - Comparativo
									<b>TIPO DE ESTUDIO:</b> 1 analítico 2 prospectivo 3 transversal o transeccional 4 observacional

			<p><b>HE10:</b> Determinar las características geotécnicas no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2:</b>  <b>HE2A:</b> Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p> <p><b>HE2O:</b> Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3:</b>  <b>HE3A:</b> Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p> <p><b>HE3O:</b> Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos no permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p>				<p>No Experimental Transversal -</p> <p><b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:</b>  No Experimental</p> <p><b>TIPO DE DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN:</b>  Transversal o transeccional</p>
	<p>2. ¿La representación del comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco, 2021?</p> <p>3. ¿Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos permitirá evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca - Cerro de Pasco, 2021?</p>	<p>2. Representar el comportamiento del suelo de fundación mediante modelos constitutivos para evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p> <p>3. Estimar el comportamiento elastoplástico mediante el método de elementos finitos para evaluar la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021.</p>				<p><b>UNIDAD MUESTRAL:</b>  Calicata o pozo exploratorio; técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico, se toma esta muestra para realizar los ensayos en laboratorio a una profundidad mínima de 1.50 metros para obtener datos de sus propiedades físicas y mecánicas del suelo.</p>	

--	--	--	--	--	--	--



## ANEXO 02 INSTRUMENTOS

### INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**DATOS INFORMATIVOS:**

**NOMBRE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:**

“Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021”

**APELLIDOS Y NOMBRES:** \_\_\_\_\_

**FECHA:** \_\_\_\_\_

**CALICATA N°:** \_\_\_\_\_

**PROGRESIVA:** \_\_\_\_\_

**COORDENADAS UTM:** \_\_\_\_\_

**LABORATORIO:** \_\_\_\_\_

Propiedades Físicas	
Tipo de Suelo	
Peso Específico (gr/cm <sup>3</sup> ó TN/m <sup>3</sup> )	
Contenido de Humedad del Suelo (%)	
Límite líquido LL (%)	
Límite plástico LP (%)	
Ind. de Plasticidad IP (%)	
Coef. de uniformidad (Cu):	
Grado de curvatura (Cc):	
Proctor Modificado (OCH gr/cm <sup>3</sup> vs MDS %)	

Propiedades Mecánicas		
Módulo de Elasticidad (Es)	MN/m <sup>2</sup>	KN/m <sup>2</sup> (Kpa)
Coeficiente de Poisson (v')		
Coeficiente de Permeabilidad (k)	m/día	cm/seg
Cohesión (C')	kg/cm <sup>2</sup>	KN/m <sup>2</sup> (Kpa)
Ángulo de Fricción (°)		
CBR (95% de la MDS y 0.1" de Penetración)		


Parámetros de Entrada de Evaluación de la Subrasante					
Descripción	Unidad	Carpeta Asfáltica	Base	SubBase	Subrasante
Modelo Constitutivo del Material	Modelo	Elástico Lineal	Elástico Lineal	Elástico Lineal	Mohr- Coulomb
Tipo de Comportamiento del Material	Tipo	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado
Peso específico del Suelo no Saturado	KN/m <sup>3</sup>				
Peso específico del Suelo Saturado	KN/m <sup>3</sup>				
Permeabilidad en Dirección Horizontal	m/día				
Permeabilidad en Dirección Vertical	m/día				
Módulo de Young	KN/m <sup>2</sup>				
Coeficiente Poisson	-				

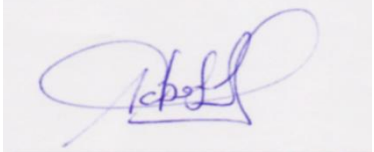






**ANEXO 03**  
**VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS**

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION</b>						
	<b>VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO</b>						
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>						
	<b>ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL</b>						
<b>Título de la Investigación:</b>	<b>Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021</b>						
<b>Nombre del Tesista:</b>	Bach. Walter Omar Bernal Ayala	<b>Asesor:</b>	Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL				
<b>Nombre del experto:</b>	Mg. CABEZAS NIEVES, Ricardo Wagner	<b>Especialidad:</b>	Magister en Gerencia de la Salud				
	<b>Calificar con 1, 2, 3, ó 4 cada ítem respecto a los criterios de relevancia, coherencia, suficiencia y claridad</b>						
<b>VARIABLE X:</b>	<b>MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS</b>						
<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS</b>	Evaluación de las Propiedades Físicas de la muestra	3	4	3	4	14.00	<b>3.50</b>
	Evaluación de las Propiedades Mecánicas de la muestra	3	4	4	3	14.00	<b>3.50</b>
	Evaluación del nivel freático en la zona de ejecución de calicata de la muestra	4	4	4	3	15.00	<b>3.75</b>
	Evaluar el tipo de suelo para configurar la posterior evaluación de la subrasante	3	4	3	4	14.00	<b>3.50</b>
	Revisión de la estratigrafía del suelo de la subrasante	3	4	4	4	15.00	<b>3.75</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.20</b>	<b>4.00</b>	<b>3.60</b>	<b>3.60</b>	14.40	<b>3.60</b>
<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>MODELO CONSTITUTIVO</b>	Evaluación del ensayo de corte directo de la muestra	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación del ensayo de CBR y Proctor Modificado	4	4	3	4	15.00	<b>3.75</b>
	Evaluación del modelo constitutivo de Mohr Coulomb, gráfico de relación del esfuerzo de corte y esfuerzo normal	3	4	4	4	15.00	<b>3.75</b>
	Evaluación de valores de cohesión y ángulo de fricción interna	3	4	4	4	15.00	<b>3.75</b>
	Revisión de los valores de la deformación tangencial, esfuerzo de corte y esfuerzo normal de la muestra	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.60</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	15.40	<b>3.85</b>
<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>METODO ELEMENTOS FINITOS</b>	Evaluación de los parámetros de entrada de los ensayos de la muestra para la simulación del comportamiento estructural de la subrasante	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Generación de Mallas de elementos geométricos triangulares con 15 nodos para evaluar los parámetros de salida de simulación	3	4	4	3	14.00	<b>3.50</b>
	Análisis comparativo de la deformación con los esfuerzos generados por las cargas con los valores del ensayo de corte directo en laboratorio	3	4	4	4	15.00	<b>3.75</b>

	Evaluación de los esfuerzos principales y desviadores generados en el software PLAXIS-2D	3	4	3	4	14.00	<b>3.50</b>
	Evaluación de los módulos de resiliencia por nivel de profundidad de la subrasante	3	4	4	4	15.00	<b>3.75</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.20</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	<b>14.80</b>	<b>3.70</b>
<b>VARIABLE Y:</b>	<b>SUBRASANTE</b>						
<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>SUBRASANTE</b>	Evaluación de los esfuerzos generados en el software Plaxis-2D en la subrasante en los elementos y nodos	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación de la deformación y desplazamiento de la subrasante por elementos y nodos en la simulación	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evolución del comportamiento elastoplástico de la subrasante según el nivel de profundidad	3	4	4	3	14.00	<b>3.50</b>
	Análisis comparativo de la deformación por los esfuerzos generados con el nivel de profundidad en la subrasante en su estado plástico	4	4	3	4	15.00	<b>3.75</b>
	Análisis comparativo del desplazamiento de la subrasante ocasionado por la deformación del suelo con el nivel de profundidad de la subrasante en su estado plástico	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	<b>15.40</b>	<b>3.85</b>
<b>CALIFICACIÓN: 1=No cumple; 2=Nivel Bajo; 3=Nivel moderado; 4= Nivel Alto</b>							
<b>¿Hay alguna dimensión o ítem que no ha sido evaluada? SI ( ) NO (X).</b>		<b>CALIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO:</b>					<b>4.00</b>
<b>En caso de SI ¿Qué dimensión o ítem falta?</b>		<b>PROM = 3.75 equiv 4.00</b>					
		<b>DECISIÓN DEL EXPERTO</b>					
		<b>CALIFICACIÓN:</b>			<b>NIVEL ALTO</b>		
<b>Mg. CABEZAS NIEVES, Ricardo Wagner</b>		<b>EL INSTRUMENTO DEBE SER APLICADO SI ( X ) NO ( )</b>					
<b>EVALUADOR</b>							



**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION**  
**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Título de la Investigación:** Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021

**Nombre del Tesista:** Bach. Walter Omar Bernal Ayala      **Asesor:** Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL


**Nombre del experto:** Mg. AYALA CALLUPE, Isabel      **Especialidad:** Magister en Psicología Educativa

**Calificar con 1, 2, 3, ó 4 cada ítem respecto a los criterios de relevancia, coherencia, suficiencia y claridad**

<b>VARIABLE X: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS</b>							
<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS</b>	Evaluación de las Propiedades Físicas de la muestra	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación de las Propiedades Mecánicas de la muestra	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación del nivel freático en la zona de ejecución de calicata de la muestra	4	4	4	3	15.00	<b>3.75</b>
	Evaluar el tipo de suelo para configurar la posterior evaluación de la subrasante	4	4	3	4	15.00	<b>3.75</b>
	Revisión de la estratigrafía del suelo de la subrasante	3	4	4	4	15.00	<b>3.75</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	15.40	<b>3.85</b>

<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>MODELO CONSTITUTIVO</b>	Evaluación del ensayo de corte directo de la muestra	4	4	4	3	15.00	<b>3.75</b>
	Evaluación del ensayo de CBR y Proctor Modificado	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación del modelo constitutivo de Mohr Coulomb, gráfico de relación del esfuerzo de corte y esfuerzo normal	4	3	4	4	15.00	<b>3.75</b>
	Evaluación de valores de cohesión y ángulo de fricción interna	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Revisión de los valores de la deformación tangencial, esfuerzo de corte y esfuerzo normal de la muestra	4	4	3	4	15.00	<b>3.75</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	15.40	<b>3.85</b>

<b>DIMENSIONES</b>	<b>ÍTEM</b>	<b>RELEVANCIA</b>	<b>COHERENCIA</b>	<b>SUFICIENCIA</b>	<b>CLARIDAD</b>	<b>TOTAL</b>	<b>C. PARCIAL</b>
<b>METODO ELEMENTOS FINITOS</b>	Evaluación de los parámetros de entrada de los ensayos de la muestra para la simulación del comportamiento estructural de la subrasante	4	4	4	3	15.00	<b>3.75</b>
	Generación de Mallas de elementos geométricos triangulares con 15 nodos para evaluar los parámetros de salida de simulación	4	4	4	3	15.00	<b>3.75</b>
	Análisis comparativo de la deformación con los esfuerzos generados por las cargas con los valores del ensayo de corte directo en laboratorio	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación de los esfuerzos principales y desviadores generados en el software PLAXIS-2D	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	Evaluación de los módulos de resiliencia por nivel de profundidad de la subrasante	4	4	4	4	16.00	<b>4.00</b>
	<b>PROMEDIO</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>3.60</b>	15.60	<b>3.90</b>

VARIABLE Y:		SUBRASANTE					
DIMENSIONES	ÍTEM	RELEVANCIA	COHERENCIA	SUFICIENCIA	CLARIDAD	TOTAL	C. PARCIAL
SUBRASANTE	Evaluación de los esfuerzos generados en el software Plaxis-2D en la subrasante en los elementos y nodos	3	4	4	4	15.00	3.75
	Evaluación de la deformación y desplazamiento de la subrasante por elementos y nodos en la simulación	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evolución del comportamiento elastoplástico de la subrasante según el nivel de profundidad	4	4	4	3	15.00	3.75
	Análisis comparativo de la deformación por los esfuerzos generados con el nivel de profundidad en la subrasante en su estado plástico	4	4	4	4	16.00	4.00
	Análisis comparativo del desplazamiento de la subrasante ocasionado por la deformación del suelo con el nivel de profundidad de la subrasante en su estado plástico	4	4	4	4	16.00	4.00
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>15.60</b>	<b>3.90</b>
<b>CALIFICACIÓN: 1=No cumple; 2=Nivel Bajo; 3=Nivel moderado; 4= Nivel Alto</b>							
¿Hay alguna dimensión o ítem que no ha sido evaluada? SI ( ) NO (X).		<b>CALIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO:</b>					<b><u>4.00</u></b>
En caso de SI ¿Qué dimensión o ítem falta?		<b>PROM = 3.88 equiv 4.00</b>					
		<b>DECISIÓN DEL EXPERTO</b>					
		<b>CALIFICACIÓN:</b>			<b>NIVEL ALTO</b>		
<b>Mg. AYALA CALLUPE, Isabel</b>		<b>EL INSTRUMENTO DEBE SER APLICADO SI ( X ) NO ( )</b>					
<b>EVALUADOR</b>							



**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION**  
**VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Título de la Investigación:** Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021

**Nombre del Tesista:** Bach. Walter Omar Bernal Ayala      **Asesor:** Dr. Luis Villar REQUIS CARBAJAL

**Nombre del experto:** Mg. PACHAS CONDOR, Kristhian Luis      **Especialidad:** Magister en Gestión Pública


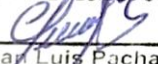
**Calificar con 1, 2, 3, ó 4 cada ítem respecto a los criterios de relevancia, coherencia, suficiencia y claridad**

**VARIABLE X: MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

DIMENSIONES	ÍTEM	RELEVANCIA	COHERENCIA	SUFICIENCIA	CLARIDAD	TOTAL	C. PARCIAL
CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	Evaluación de las Propiedades Físicas de la muestra	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evaluación de las Propiedades Mecánicas de la muestra	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evaluación del nivel freático en la zona de ejecución de calicata de la muestra	4	4	3	3	14.00	3.50
	Evaluar el tipo de suelo para configurar la posterior evaluación de la subrasante	4	4	4	4	16.00	4.00
	Revisión de la estratigrafía del suelo de la subrasante	4	4	4	4	16.00	4.00
	<b>PROMEDIO</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	15.60	<b>3.90</b>

DIMENSIONES	ÍTEM	RELEVANCIA	COHERENCIA	SUFICIENCIA	CLARIDAD	TOTAL	C. PARCIAL
MODELO CONSTITUTIVO	Evaluación del ensayo de corte directo de la muestra	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evaluación del ensayo de CBR y Proctor Modificado	4	4	3	4	15.00	3.75
	Evaluación del modelo constitutivo de Mohr Coulomb, gráfico de relación del esfuerzo de corte y esfuerzo normal	3	4	4	4	15.00	3.75
	Evaluación de valores de cohesión y ángulo de fricción interna	4	4	4	4	16.00	4.00
	Revisión de los valores de la deformación tangencial, esfuerzo de corte y esfuerzo normal de la muestra	4	4	4	4	16.00	4.00
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	15.60	<b>3.90</b>

DIMENSIONES	ÍTEM	RELEVANCIA	COHERENCIA	SUFICIENCIA	CLARIDAD	TOTAL	C. PARCIAL
METODO ELEMENTOS FINITOS	Evaluación de los parámetros de entrada de los ensayos de la muestra para la simulación del comportamiento estructural de la subrasante	4	3	4	3	14.00	3.50
	Generación de Mallas de elementos geométricos triangulares con 15 nodos para evaluar los parámetros de salida de simulación	4	4	4	3	15.00	3.75
	Análisis comparativo de la deformación con los esfuerzos generados por las cargas con los valores del ensayo de corte directo en laboratorio	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evaluación de los esfuerzos principales y desviadores generados en el software PLAXIS-2D	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evaluación de los módulos de resiliencia por nivel de profundidad de la subrasante	4	4	4	4	16.00	4.00
	<b>PROMEDIO</b>	<b>4.00</b>	<b>3.80</b>	<b>4.00</b>	<b>3.60</b>	15.40	<b>3.85</b>


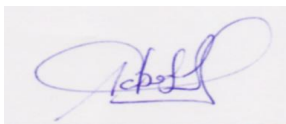
VARIABLE Y:		SUBRASANTE					
DIMENSIONES	ÍTEM	RELEVANCIA	COHERENCIA	SUFICIENCIA	CLARIDAD	TOTAL	C. PARCIAL
SUBRASANTE	Evaluación de los esfuerzos generados en el software Plaxis-2D en la subrasante en los elementos y nodos	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evaluación de la deformación y desplazamiento de la subrasante por elementos y nodos en la simulación	4	4	4	4	16.00	4.00
	Evolución del comportamiento elasto-plástico de la subrasante según el nivel de profundidad	4	4	4	4	16.00	4.00
	Análisis comparativo de la deformación por los esfuerzos generados con el nivel de profundidad en la subrasante en su estado plástico	4	4	4	4	16.00	4.00
	Análisis comparativo del desplazamiento de la subrasante ocasionado por la deformación del suelo con el nivel de profundidad de la subrasante en su estado plástico	4	4	4	4	16.00	4.00
	<b>PROMEDIO</b>		<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	<b>4.00</b>	16.00
<b>CALIFICACIÓN: 1=No cumple; 2=Nivel Bajo; 3=Nivel moderado; 4= Nivel Alto</b>							
¿Hay alguna dimensión o ítem que no ha sido evaluada? SI ( ) NO (X).		<b>CALIFICACIÓN DEL INSTRUMENTO:</b>					<b><u>4.00</u></b>
En caso de SI ¿Qué dimensión o ítem falta?		<b>PROM = 3.91 equiv 4</b>					
 INSTITUCION EDUCATIVA EMBLEMATICA DANIEL ALCIDES CARRION  Mg. Kristhian Luis Pachas Condor EDUCACION PARA EL TRABAJO		<b>DECISIÓN DEL EXPERTO</b>					
		<b>CALIFICACIÓN:</b>			<b>NIVEL ALTO</b>		
<b>Mg. PACHAS CONDOR, Kristhian Luis</b>		<b>EL INSTRUMENTO DEBE SER APLICADO SI ( X ) NO ( )</b>					
<b>EVALUADOR</b>							

## PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS






### VALIDEZ DEL INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS:

El instrumento de recolección fue evaluado por los expertos mediante un formato de validación del instrumento construido según el Método de Agregados Individuales, a partir de ello se evaluará la validez de contenido, validez de criterio, validez de constructo y la **confiabilidad del instrumento de recolección de datos**.

**Validez de Contenido:** Refiere al dominio del contenido de lo que queremos medir, el instrumento de recolección de datos es calificado mediante el formato de validación del instrumento, donde la calificación de los tres expertos fue de 4.00 con Nivel Alto, para evaluar la Validez de Contenido se consideró esta información para la calificación:

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION</b>		
	<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
	<b>ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL</b>		
	<b>VALIDEZ DE CONTENIDO</b>		
<b>Título de la Investigación:</b>	<b>Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021</b>		
<b>Nombre del Tesista:</b>	Bach. Walter Omar Bernal Ayala	<b>Asesor:</b>	Dr. REQUIS CARBAJAL, Luis Villar
<b>Nombre del experto:</b>	Mg. CABEZAS NIEVES, Ricardo Wagner	<b>Especialidad:</b>	Magister en Gerencia de la Salud
<b>Calificar con 1, 2, 3, ó 4 cada ítem respecto a los criterios de relevancia, coherencia, suficiencia y claridad</b>			
<b>VALIDEZ DE CONTENIDO</b>			
<b>TIPO DE EVALUACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CALIF.</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Validez de Contenido	La matriz de consistencia y la operacionalización de variables son coherentes en relación a su prueba de hipótesis y uso de los instrumentos de recolección de datos.	4.00	
Validez de Criterio Metodológico	Se encuentra aplicado dentro del método científico.	4.00	
Validez de intención y objetividad de medición y observación	Las variables para la prueba de hipótesis de forma comparativa tienen relación con los parámetros de entrada y salida del instrumento de recolección de datos.	3.00	
Presentación y formalidad del instrumento	El instrumento de recolección de datos permite obtener información relevante para el proceso de simulación del comportamiento elastoplástico de la subrasante.	4.00	
<b>PROMEDIO</b>		<b>3.75</b>	
<b>CALIFICACIÓN: 1=No cumple; 2=Nivel Bajo; 3=Nivel moderado; 4= Nivel Alto</b>			
<b>DECISIÓN DEL EXPERTO</b>			
CALIFICACION: 3.75 equiv <u>4.00</u> (NIVEL ALTO)			
EL INSTRUMENTO DEBE SER APLICADO: SI ( X ) NO ( )		<b>Mg. CABEZAS NIEVES, Ricardo Wagner</b>	
		<b>EVALUADOR</b>	



		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION</b>	
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
		<b>ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL</b>	
		<b>VALIDEZ DE CONTENIDO</b>	
<b>Título de la Investigación:</b>	<b>Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021</b>		
<b>Nombre del Tesista:</b>	Bach. Walter Omar Bernal Ayala	<b>Asesor:</b>	Dr. REQUIS CARBAJAL, Luis Villar
<b>Nombre del experto:</b>	Mg. CABEZAS NIEVES, Ricardo Wagner	<b>Especialidad:</b>	Magister en Gerencia de la Salud
<b>Calificar con 1, 2, 3, ó 4 cada ítem respecto a los criterios de relevancia, coherencia, suficiencia y claridad</b>			
<b>VALIDEZ DE CONTENIDO</b>			
<b>TIPO DE EVALUACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CALIF.</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Validez de Contenido	La matriz de consistencia y la operacionalización de variables son coherentes en relación a su prueba de hipótesis y uso de los instrumentos de recolección de datos.	4.00	
Validez de Criterio Metodológico	Se encuentra aplicado dentro del método científico.	4.00	
Validez de intención y objetividad de medición y observación	Las variables para la prueba de hipótesis de forma comparativa tienen relación con los parámetros de entrada y salida del instrumento de recolección de datos.	4.00	
Presentación y formalidad del instrumento	El instrumento de recolección de datos permite obtener información relevante para el proceso de simulación del comportamiento elastoplástico de la subrasante.	3.00	
<b>PROMEDIO</b>		<b>3.75</b>	
<b>CALIFICACIÓN: 1=No cumple; 2=Nivel Bajo; 3=Nivel moderado; 4= Nivel Alto</b>			
<b>DECISIÓN DEL EXPERTO</b>			
<b>CALIFICACION: 3.75 equiv 4.00 (NIVEL ALTO)</b>			
<b>EL INSTRUMENTO DEBE SER APLICADO: SI ( X ) NO ( )</b>			<b>Mg. AYALA CALLUPE, Isabel</b>
			<b>EVALUADOR</b>
		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION</b>	
		<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>	
		<b>ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL</b>	
		<b>VALIDEZ DE CONTENIDO</b>	
<b>Título de la Investigación:</b>	<b>Método de Elementos Finitos y su aplicación en la evaluación de la subrasante de la Carretera Yanahuanca – Cerro de Pasco, 2021</b>		
<b>Nombre del Tesista:</b>	Bach. Walter Omar Bernal Ayala	<b>Asesor:</b>	Dr. REQUIS CARBAJAL, Luis Villar
<b>Nombre del experto:</b>	Mg. PACHAS CONDOR, Kristhian Luis	<b>Especialidad:</b>	Magister en Gestión Pública
<b>Calificar con 1, 2, 3, ó 4 cada ítem respecto a los criterios de relevancia, coherencia, suficiencia y claridad</b>			
<b>VALIDEZ DE CONTENIDO</b>			
<b>TIPO DE EVALUACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CALIF.</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Validez de Contenido	La matriz de consistencia y la operacionalización de variables son coherentes en relación a su prueba de hipótesis y uso de los instrumentos de recolección de datos.	4.00	
Validez de Criterio Metodológico	Se encuentra aplicado dentro del método científico.	4.00	
Validez de intención y objetividad de medición y observación	Las variables para la prueba de hipótesis de forma comparativa tienen relación con los parámetros de entrada y salida del instrumento de recolección de datos.	4.00	
Presentación y formalidad del instrumento	El instrumento de recolección de datos permite obtener información relevante para el proceso de simulación del comportamiento elastoplástico de la subrasante.	4.00	
<b>PROMEDIO</b>		<b>4.00</b>	
<b>CALIFICACIÓN: 1=No cumple; 2=Nivel Bajo; 3=Nivel moderado; 4= Nivel Alto</b>			
<b>DECISIÓN DEL EXPERTO</b>			 
<b>CALIFICACION: 4.00 (NIVEL ALTO)</b>			
<b>EL INSTRUMENTO DEBE SER APLICADO: SI ( X ) NO ( )</b>			<b>Mg. PACHAS CONDOR, Kristhian Luis</b>
			<b>EVALUADOR</b>

Según el juicio de expertos se cuantifica la validez de contenido de acuerdo a la calificación:

VALIDEZ DE CONTENIDO						
N°		1	2	3	4	TOTAL
1	EXPERTO 1	4	4	3	4	15
2	EXPERTO 2	4	4	4	3	15
3	EXPERTO 3	4	4	4	4	16
TOTAL		12	12	11	11	46
PROMEDIO		4	4	3.66666667	3.66666667	15.33333333
VALIDEZ DE CONTENIDO (JUICIO DE EXPERTOS)						<b>0.96</b>

Entonces: **Validez de Contenido = 0.96**

### Validez de Criterio:

El evalúa el instrumento de recolección de datos con otra variable para correlacionarlo, en este caso un variable en donde se evaluaron la validez del instrumento de recolección de datos usando la relevancia, para comprobar la homogeneidad se trabajará con el método del coeficiente Alfa Cronbach que se usa para

medir la confiabilidad.

		VALIDEZ DE CRITERIO																				TOTAL
N°	EXPERTOS	ITEM DE RELEVANCIA																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	EXPERTO 1	3	3	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	3	4	4	3	4	4	4	69
2	EXPERTO 2	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	78
3	EXPERTO 3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	79
TOTAL		11	11	12	11	10	12	12	10	11	12	12	11	11	11	11	11	12	11	12	12	226
PROMEDIO		3.67	3.67	4.00	3.67	3.33	4.00	4.00	3.33	3.67	4.00	4.00	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	4.00	3.67	4.00	4.00	75.33
DESV. EST.		0.58	0.58	0.00	0.58	0.58	0.00	0.00	0.58	0.58	0.00	0.00	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.00	0.58	0.00	0.00	4.50
VARIANZA		0.22	0.22	0.00	0.22	0.22	0.00	0.00	0.22	0.22	0.00	0.00	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.00	0.22	0.00	0.00	20.22

$\sum S_i^2$	2.67	$\alpha = \frac{K}{K-1} \left[ 1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2} \right] = 0.91$	ALFA DE CRONBACH
$S_T^2$	20.22		$\alpha = 0.91$
K	20		

Entonces: **Validez de Criterio = 0.91**

**Validez de Constructo:** Se prueba la validación del instrumento en relación en la construcción de los parámetros para probar la hipótesis de la mano con el concepto

teórico, en nuestro caso los valores de esfuerzo-deformación realizados el ensayo en laboratorio y en la simulación con el software PLAXIS-2D se demostró la asociación de forma comparativa de ambas variables la Hipótesis Específica 1, se realizará como un análisis del factor de la diferencia entre los esfuerzos de corte del ensayo y de PLAXIS-2D según la dispersión de datos de ambas muestras en base a lo que se elaboró en la prueba de Hipótesis Específica 1 desde la Figura 128 hasta la Figura 133, en este en Jamovi trabajaremos con el cuadro estadístico.

Note: A low p-value suggests a violation of the assumption of normality

### Descriptives

Descriptives	desplazamiento	esf corte lab1	esf plaxis	esf corte lab2	esf corte plaxis 2	DIF ESF CORTE1	DIF ESF CORTE2
N	31	31	31	31	31	31	31
Mean	6.06	29.2	32.5	26.9	26.9	-3.36	-0.0365
Median	4.00	35.2	37.9	30.5	31.4	-3.73	-0.170
Standard deviation	5.82	15.1	16.2	13.5	13.4	1.62	1.38
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.49	-2.36
Maximum	18.0	45.1	48.7	43.1	40.2	0.130	3.19

Con los resultados estadísticos del esfuerzo de corte entre el ensayo de laboratorio y de la simulación el PLAXI-2D se evaluará según la diferencia de la dispersión de datos, es decir con el porcentaje de la desviación estándar de la diferencia del esfuerzo de corte 1 sobre la segunda variable.

$$\text{Validez de Constructo} = 1.38/1.62 = 0.85$$

Entonces: **Validez de Constructo = 0.85**

## CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS:

La confiabilidad mide la exactitud y la consistencia de la información recopilada con el instrumento de recolección de datos, para medir el grado de confiabilidad se usará el método del Coeficiente Alfa de Cronbach para respuestas politómicas en función a la varianza de los datos, se evaluará de todos los ítems de la validez de los instrumentos de los expertos con las variables relacionadas a la calificación.

N°	EXPERTOS	CONFIABILIDAD																								TOTAL	
		ITEM DE RELEVANCIA																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
1	Propiedades Físicas	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	82	
2	Propiedades Mecánicas	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3	4	3	4	3	3	3	3	86	
3	Nivel freático	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	3	3	4	4	4	3	4	4	4	3	3	3	3	3	86	
4	Tipo de suelo	3	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	81	
5	Estratigrafía	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	83	
6	Ensayo de corte directo	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	95	
7	Ensayo de CBR	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	94	
8	Mohr Coulomb	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	90	
9	Cohesión y ángulo de fricción interna	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	95	
10	Deformación tangencial-esfuerzo	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	3	3	4	4	4	4	4	91	
11	Parametros de entrada de simulación	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	4	4	4	3	3	3	3	4	3	88
12	Generación Mallas y nodos	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	81	
13	Esfuerzo-Deformación en la simulación	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	87	
14	Esfuezos principales y desviadores	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	91
15	Módulo de resiliencia	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	94	
16	Esfuerzo en los elementos y nodos	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4	93	
17	Deformacion y desplazamientos en los nodos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	96	
18	Comportamiento elastoplástico de la subrasante	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	90	
19	Deformación según nivel de profundidad de subrasante	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	91	
20	Desplazamiento según nivel de profundidad de subrasante	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	96	
TOTAL		69	80	75	76	78	79	78	75	79	79	78	77	69	77	72	72	75	71	73	71	71	72	72	72	1,790	
PROMEDIO		3.45	4.00	3.75	3.80	3.90	3.95	3.90	3.75	3.95	3.95	3.90	3.85	3.45	3.85	3.60	3.60	3.75	3.55	3.65	3.55	3.95	3.60	3.60	89.50		
DESV. EST.		0.51	0.00	0.44	0.41	0.31	0.22	0.31	0.44	0.22	0.22	0.31	0.37	0.51	0.37	0.50	0.50	0.44	0.51	0.49	0.51	0.51	0.50	0.50	4.90		
VARIANZA		0.25	0.00	0.19	0.16	0.09	0.05	0.09	0.19	0.05	0.05	0.09	0.13	0.25	0.13	0.24	0.24	0.19	0.25	0.23	0.25	0.25	0.24	0.24	24.05		

$\sum S_i^2$	4.06	$\alpha = \frac{K}{K-1} \left[ 1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2} \right]$	ALFA DE CRONBACH	
$S_T^2$	24.05		$\alpha =$	0.87
K	24		CONFIABILIDAD = 0.87	

Entonces: **CONFIABILIDAD = 0.87**

**Validez = Promedio (validez de contenido, validez de criterio, validez de constructo)**

**Validez = Promedio (0.96; 0.91; 0.85) = 0.91**

**Confiabilidad = 0.87**

Según el rango de magnitud de la confiabilidad y validez, nuestro instrumento de recolección de datos tiene un grado muy alto de confiabilidad y validez.

La tabla indica la Escala de interpretación de la magnitud del Coeficiente de Correlación y Asociación:

Rangos	Magnitud
0,81 a 1,00	Muy Alta
0,61 a 0,80	Alta
0,41 a 0,60	Moderada
0,21 a 0,40	Baja
0,01 a 0,20	Muy Baja

**Nota.** Tomado de Ruiz Bolívar (2002) y Pallella y Martins (2003).

**Confiabilidad = 0.87 (Grado Muy Alto)**

**Validez = 0.91 (Grado Muy Alto)**

**Conclusión:** Se acepta el instrumento de recolección de datos y debe ser aplicado.