



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN LA RAMA
DE LAS VÍAS TERRESTRES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

***SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PRUEBA
TRIAxIAL CÍCLICA
CASO DE ESTUDIO: ARCILLAS DEL EX LAGO
DE TEXCOCO***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

CONCEPCIÓN DE LEÓN GARCÍA

ASESOR:

DR. LUIS ALBERTO MORALES ROSALES

CO - ASESOR DE TESIS

DRA. LUISA NICTÉ EQUIHUA ANGUIANO.

MORELIA, MICHOACAN. DICIEMBRE DEL 2021.



AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarme a tomar las mejores decisiones y por haberme acompañado a lo largo de la maestría, por darme fortaleza en tiempos de debilidad y por brindarme aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A mi familia por su apoyo constante en cada una de las decisiones de mi vida y en mi formación como profesional.

Al Dr. Luis Alberto Morales Rosales por sus indicaciones, contribuciones, consejos y tiempo invertido, a fin de sacar adelante este proyecto de tesis.

A la Dra. Luisa Nicté Equihua Anguiano principalmente por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto de tesis, por su paciencia, manera de trabajar, dedicación y motivación.

Al Dr. Jaime Saavedra por motivarme a cada momento durante el trayecto de esta maestría y sobre todo por cada consejo que me brindo en este proyecto.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio económico brindado, con el cual pude concluir una parte clave de mi formación académica.

A mis amigos, a todos ellos quienes siempre han aportado su granito de arena de alguna forma u otra para lograr mis metas académicas y personales.

A mis compañeros quienes fueron testigos de momentos difíciles, de momentos de esfuerzo y apoyo brindado cuando más lo necesite.

A los catedráticos por su dedicación a la enseñanza de sus conocimientos y experiencia durante la maestría.

Al Posgrado de ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por haberme permitido formar parte de una generación más, nido de muchos que al igual que yo eligieron esta extraordinaria maestría.

Agradezco a todas las personas que, de alguna manera, directa o indirecta me han acompañado a lo largo de este breve lapso de mi vida.

RESUMEN

Las pruebas triaxiales cíclicas son una excelente alternativa para determinar las propiedades mecánicas del suelo, sin embargo, el equipo y las pruebas son costosos. En México, muy pocos laboratorios cuentan con estos equipos triaxiales cíclicos y que para el caso de las vías terrestres nos permiten probar los materiales que conforman los pavimentos.

Las pruebas triaxiales cíclicas entre otras utilidades en la Ingeniería Civil se usan para medir el módulo resiliente del suelo de la subrasante y de las demás capas de los pavimentos y nos permiten evaluar el comportamiento elástico no lineal de los suelos. Estos ensayos se realizan sobre un rango de esfuerzos verticales y presiones confinadas, obteniendo diferentes módulos elásticos en función de los esfuerzos hasta alcanzar un módulo elástico constante al que nombramos módulo resiliente.

En esta tesis, se toman resultados de laboratorio obtenidos de una muestra de suelo arcilloso del antiguo Lago de Texcoco de alta compresibilidad como el punto de partida, para realizar una prueba triaxial numérica con el software Plaxis® basado en elementos finitos, prueba que en la práctica se lleva a cabo únicamente en laboratorio. La simulación desarrollada representa el efecto de las cargas cíclicas sobre la capa de la subrasante y con base en la norma AASHTO, para obtener el comportamiento del suelo por la influencia de la componente mecanicista. La simulación permitió calcular los módulos resilientes correspondientes a la aplicación de estas cargas de una forma numérica usando el modelo Hardening Soil por ser el más adecuado a los procesos constructivos de los pavimentos.

En los resultados se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en el laboratorio y entre las principales conclusiones, se encontró que los modelos numéricos nos permiten llevar a cabo pruebas que en la práctica se llevan a cabo en el laboratorio y que si carecemos de éste se pueden obtener a través de herramientas numéricas. De igual forma permite evaluar los resultados obtenidos por los dos medios, de tal forma que se haga más eficiente el proceso de construcción en la vida práctica.

Palabras clave: prueba triaxial cíclica, simulación numérica, esfuerzo- deformación, método de elementos finitos, Modulo Resiliente (MR).

ABSTRACT

The Cyclic triaxial tests are an excellent alternative to determine mechanic soil properties. However, the equipment and tests are costly. In Mexico, very few laboratories have this cyclical triaxial equipment, and in the case of land routes, they allow us to test the materials that make up the pavements.

The cyclical triaxial tests, among other utilities in Civil Engineering, are used to measure the resilient modulus of the subgrade soil and the other layers of the pavements and evaluate the non-linear elastic behavior of the soils. These tests are carried out over a range of vertical strain and confining pressures, obtaining different elastic module as a function of the strain until reaching a constant elastic modulus which we call the resilient modulus.

In this thesis, laboratory results obtained from a clay soil sample from the old Lake of Texcoco of high compressibility are taken as the starting point, to perform a numerical triaxial test with the Plaxis® software based on finite elements, proving that in the practice is carried out only in the laboratory. The simulation developed represents the effect of cyclical loads on the subgrade layer and based on the AASHTO standard, to obtain the behavior of the soil due to the influence of the mechanistic component. The simulation made it possible to calculate the resilient modules corresponding to the application of these loads in a numerical way using the Hardening Soil model as it is the most suitable for pavement construction processes.

The results obtained similar results to those obtained in the laboratory and among the main conclusions, it was found that numerical models allow us to carry out tests that in practice are carried out in the laboratory and that if we lack it, we can get through numerical tools. In the same way, it allows evaluating the results obtained by the two means so that the construction process is made more efficient in practical life.

Keywords: Cyclic triaxial test, numerical simulation, Hardening Soil, strains-stresses, finite element method, Resilient Modulus (MR).

Índice general

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	VI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PROBLEMÁTICA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVO GENERAL:	5
1.3.1 <i>Objetivos específicos:</i>	5
1.4 PROPUESTA METODOLÓGICA	5
2 MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	7
2.2 METODOLOGÍAS DE DISEÑOS DE PAVIMENTOS.....	8
2.2.1 <i>Boussinesq y Burmister</i>	9
2.2.2 <i>Guía de diseño de pavimento AASHTO de 1993</i>	9
2.2.3 <i>Módulo Resiliente</i>	10
2.2.3.1 Factores que afectan el Módulo de Resiliencia	12
2.2.4 <i>Método de Elementos Finitos</i>	14
2.2.4.1 Programa Plaxis.....	15
2.2.5 <i>Modelos constitutivos</i>	16
2.2.5.1 Modelo Mohr-Coulomb.....	17
2.2.5.2 Modelo Hardening Soil	19
3 ESTADO DEL ARTE	21
3.1 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	21
3.1.1 <i>Norma AASHTO T 307-99 (2012)</i>	21
3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL-NUMÉRICO	23
3.3 EVALUACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE.....	25
3.3.1 <i>Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del ex Lago</i>	25
3.3.2 <i>Determinación del módulo de resiliencia de las arcillas del ex Lago de Texcoco</i>	26

4	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PRUEBA TRIAXIAL CÍCLICA	28
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA	28
5	IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PRUEBA TRIAXIAL CÍCLICA	40
6	RESULTADOS	52
7	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	72
7.1	CONCLUSIONES.....	72
7.2	TRABAJO FUTURO.....	74
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXOS.....	80

Índice de figuras

<i>Figura 2.1: Definición del Módulo Resiliente.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4.1: Metodología para la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.2: Definición de términos de módulos resilientes.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.3: Relación esfuerzo-deformación hiperbólica en carga primaria para un drenaje estándar prueba triaxial (Schanz et al., 1999).</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.4: Representación de esfuerzos para un ensayo triaxial.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.5: Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador (SCT., 2001).</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.1: Montaje de probeta de suelo en cámara triaxial (Lerma 2017).</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.2: Geometría simplificada de la prueba triaxial en modelos de elementos finitos (Elaboración propia).....</i>	<i>44</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 3.1: Estado del arte de los modelos constitutivos.</i>	24
<i>Tabla 4.1: Valore típicos del módulo de resiliencia para suelos de grano fino.</i>	30
<i>Tabla 4.2: Sistema unificado de clasificación de suelos de grano fino.</i>	30
<i>Tabla 4.3: Secuencia de cargas aplicadas a la prueba triaxial de la norma AASHTO T 307-99</i>	32
<i>Tabla 5.1: Propiedad índice de muestra (Lerma 2017).</i>	40
<i>Tabla 5.2: Secuencia de prueba para arcillas del ex Lago de Texcoco (Lerma, 2017).</i>	43
<i>Tabla 6.1: Valores de los parámetros de las pruebas calibradas (Elaboración propia).</i>	63
<i>Tabla 6.2: Valores de los parámetros de las pruebas calibradas con Módulos Resilientes similares (Elaboración propia).</i>	67
<i>Tabla 6.3: Correlación de Pearson (Elaboración propia).</i>	67
<i>Tabla 6.4: Valores de deformación unitaria y Módulos Resilientes de las pruebas más relevante.</i>	68
<i>Tabla 6.5: Valores de deformación unitaria y Módulos Resilientes similares (Elaboración propia).</i>	69

Índice de gráficas

Gráfica 5.1: Módulo de resiliencia del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Lerma 2017).	41
Gráfica 5.2: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).	46
Gráfica 5.3: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).	46
Gráfica 5.4: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).	47
Gráfica 5.5: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).	47
Gráfica 5.6: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).	48
Gráfica 5.7: Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador (Elaboración propio).	51
Gráfica 6.1: Patrón de carga haversiano (AASHTO-T 307-99, 2012).	52
Gráfica 6.2: Patrón de carga haversiano (Elaboración propia).	53
Gráfica 6.3: Ejemplo del pulso haversiano (elaboración propia).	53
Gráfica 6.4: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Primera opción (Elaboración propia).	54
Gráfica 6.5: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=33.12 MPa.	54
Gráfica 6.6: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=33.12 MPa.	55
Gráfica 6.7: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Segunda opción (Elaboración propia).	55
Gráfica 6.8: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=14.90 MPa	56
Gráfica 6.9: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=14.90 MPa.	56
Gráfica 6.10: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Tercera opción (Elaboración propia).	57
Gráfica 6.11: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=13.50 MPa	57
Gráfica 6.12: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=13.50 MPa.	58
Gráfica 6.13: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Cuarta opción (Elaboración propia).	58
Gráfica 6.14: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=10.65 MPa.	59
Gráfica 6.15: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=10.65 MPa	59
Gráfica 6.16: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Quinta opción (Elaboración propia).	60
Gráfica 6.17: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=9.43 MPa.	60

<i>Gráfica 6.18: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=9.43 MPa.</i>	<i>61</i>
<i>Gráfica 6.19: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Opción seleccionada (Elaboración propia)</i>	<i>62</i>
<i>Gráfica 6.20:Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=9.0 MPa.....</i>	<i>62</i>
<i>Gráfica 6.21: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=9.0 MPa</i>	<i>63</i>
<i>Gráfica 6.22: Pruebas representativas de calibración de suelo (Elaboración propia).</i>	<i>66</i>
<i>Gráfica 6.23:ódulos Resilientes de pruebas representativas de calibración de suelo (Elaboración propia).</i>	<i>66</i>
<i>Gráfica 6.24: Coeficiente de determinación (Elaboración propia).</i>	<i>68</i>
<i>Gráfica 6.25: Relación entre el Módulo Resiliente y la cohesión (Elaboración propia).....</i>	<i>70</i>
<i>Gráfica 6.26: Relación entre el Módulo Resiliente y el ángulo de fricción (Elaboración propia).</i>	<i>71</i>

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La infraestructura carretera es importante, debido que partir de ésta, los usuarios se pueden comunicar de un lugar a otro, transportar materiales, etc. lo que ha contribuido en gran medida al desarrollo económico y social en todo el mundo. Por esta razón, los pavimentos deben de diseñarse tomando en cuenta todos los parámetros necesarios para su correcto funcionamiento y de acuerdo a la evolución de las tecnologías de transporte y de la ingeniería en general.

Se entiende por pavimento al conjunto de capas de materiales seleccionados, que se construyen sobre las terracerías. La estructura de los pavimentos flexibles tiene como superficie de rodamiento una capa de mezcla asfáltica, apoyada sobre otras capas formadas por suelos con características específicas de resistencia y calidad necesarias para soportar las cargas provenientes del paso vehicular establecidas por normas que rigen su diseño con distintas propiedades mecánicas, garantizando una superficie sin agrietamientos, cómoda y segura para el usuario.

Uno de los elementos estructurales que requiere mayor énfasis en el diseño de los pavimentos para evitar deformaciones en las capas superiores, es la subrasante. La caracterización de la subrasante permite el diseño de una cimentación adecuada para el pavimento, con base en el soporte disponible en esta capa, se puede diseñar una estructura de pavimento adecuada para el tránsito y el clima esperado (Shabbir & Soo, 2014).

En el desarrollo de las investigaciones sobre el impacto de la carga móvil del tránsito (paso de eje un vehículo) en el comportamiento de los materiales que constituyen al pavimento, es importante conocer la acción de una carga dinámica aplicada en la estructura del pavimento y el cómo impacta, de tal forma que se use el parámetro determinado como módulo resiliente (M_R) el que de una forma experimental nos permite determinar el comportamiento del material ante cargas cíclicas aplicadas, las cuales además están estandarizadas (AASHTO T 307-99, 2012).

El módulo resiliente M_R se puede definir como el cociente del esfuerzo desviador aplicado entre la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga, el cual, es un parámetro dinámico que caracteriza la deformabilidad de las capas granulares y de suelo de subrasante. Este parámetro es utilizado para el diseño de los espesores de las capas propias de la estructura del pavimento (Romero, 2018).

Las pruebas de compresión triaxial de carga repetida se utilizan para medir el módulo resiliente de los suelos de la subrasante. Estas pruebas se realizan sobre un rango de esfuerzos verticales y presiones de confinamiento para evaluar el comportamiento elástico no lineal de los suelos, en la que se obtiene diferentes módulos resilientes dependiendo de los esfuerzos hasta llegar al módulo resiliente constante. En otras palabras, para la mayoría de los suelos de calzada, el módulo depende del estado de esfuerzo utilizado (Von & Killingsworth, 1997).

En este estudio, se toma como punto de análisis la muestra de suelo de arcillas de alta compresibilidad del ex Lago de Texcoco (Lerma T., 2017), la cual se utilizó para realizar una prueba triaxial experimental. Los datos obtenidos de este trabajo, se usaron para desarrollar un modelo numérico de la prueba triaxial cíclica. Por lo tanto, esto representa el efecto que muestra en la capa de la subrasante en función de las cargas aplicadas al pavimento, a partir de la influencia de la componente mecanicista y de acuerdo a la normativa AASHTO que es la que se usa en el diseño mecanicista de los pavimentos.

1.1 Problemática

En general en México el diseño estructural de pavimentos flexibles se basa en metodologías empíricas, dejando de lado el concepto mecanicista (esfuerzos - deformaciones). En la teoría mecanicista, se caracteriza de manera más realista a los pavimentos en servicio, debido a que utilizan modelos de desempeño del pavimento basados en principios enfocados en la mecánica de materiales, dando mayor confiabilidad a los diseños (Garnica & Correa, 2004).

Para lograr un buen diseño en la estructura de los pavimentos se debe de conocer la importancia de la función de la subrasante, debido a que su principal característica es soportar las cargas que transmiten al pavimento y darle sustentación, además de considerarse como la cimentación de la carretera, en donde entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento es menor (Camacho, Molina, & Reyes, 2015).

En ese sentido, es indispensable estudiar el efecto que se presenta en la subrasante en función del tránsito vehicular, del clima y del tipo de material (tipo de terreno), principalmente el análisis de este último, ya que es el que nos proporciona el módulo resiliente de la subrasante, para obtener los esfuerzos y deformaciones mediante una prueba numérica triaxial cíclica.

En México, hay muy pocos lugares en los que cuentan con equipos triaxiales cíclicos, para hacer pruebas en materiales para pavimentos (Pérez, 2008). Los ensayos de compresión triaxial son una excelente alternativa a nivel de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas de los suelos, pero por lo regular los equipos y ensayos que se realizan en ellos son costosos.

Otro elemento importante que es necesario analizar son los esfuerzos y deformaciones a partir de la influencia de la componente mecanicista de la subrasante con base a los parámetros del módulo resiliente y de la relación de Poisson.

1.2 Justificación

Los pavimentos están sometidas a la acción constante de cargas producidas por las llantas de los vehículos, las cuales, generan cargas verticales sobre su estructura. Por lo tanto, generan deformaciones, en la que el diseño de los pavimentos no cumple con la edad para la que fueron construidos. Todo diseño de pavimentos lo que busca principalmente es aumentar su vida útil, mejorar el confort y seguridad del usuario, para lograr esto se necesita mejorar la forma en que se diseña la subrasante.

Sin embargo, los espesores y propiedades de las capas de una estructura de pavimento son altamente determinados por la rigidez de la subrasante. En nuestro caso, se analiza desde un método mecanicista a partir de los esfuerzo y deformaciones que se aplican en las capas del pavimento, utilizando como análisis el método de elementos finitos y mediante un modelo constitutivo adecuado al comportamiento derivado de los pavimentos.

Últimamente se ha desarrollado una nueva tecnología para el estudio análisis de pavimentos la cual emplea programas de elementos finitos para la determinación de esfuerzos y deformaciones (Hidalgo & Rodríguez , 2004).

Los análisis mediante el método de elementos finitos simulan problemas complejos de ingeniería y reducen los costos de pruebas experimentales (Bravo et al., 2014). También, el modelado permite un mejor control de los parámetros físicos del suelo y el ajuste de las variables de funcionamiento, así como la posibilidad de replicar pruebas en periodos cortos independientemente del tiempo (Hernández, y otros, 2019).

Los métodos de análisis numérico aproximados son utilizados para el diseño de pavimentos flexibles, a través de los cuales se pueden determinar de manera aproximada módulos resilientes por medio de retro análisis de ensayos in situ y se caracterizan por tener en cuenta la influencia del estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura de pavimento en el comportamiento del mismo (Hidalgo & Rodríguez , 2004).

Los métodos numéricos son designados como modelos constitutivos, que pretenden simular de manera similar el comportamiento del suelo mediante leyes físicas dispuestas en términos numéricos. La creación de modelos numéricos que se asemejan a la realidad física de los diferentes tipos de suelos, es un campo importante de estudio en los últimos años (Hernández & Poveda, 2013).

El modelo avanzado que implica la dependencia del esfuerzo y la tensión en función de la rigidez, debido a la plastificación del material es el Hardening Soil. El endurecimiento se presenta debido al aumento de la rigidez causada por el comportamiento elástico no lineal del suelo. Este modelo puede simular el comportamiento de carga y descarga en suelos granulares y cohesivos

Debido a que las propiedades del suelo pueden ser variables en el tiempo y el espacio, una manera de determinar el comportamiento del suelo es mediante la realización de pruebas de laboratorio que reproduzcan de manera aproximada las condiciones a las cuales está sujeto el suelo; de acuerdo con los estudios relacionados al tema, las mejores pruebas de laboratorio disponibles para la determinación de los parámetros mecánicos de los suelos son las pruebas de compresión triaxial (Juarez & Rico).

De esta manera es que se propone la realización de una simulación numérica de la prueba triaxial cíclica, aproximada a partir de una prueba de laboratorio de compresión triaxial mediante la calibración de un suelo, en la que se puede determinar los esfuerzos y las deformaciones de la capa de subrasante. De esta manera se pretende garantizar la calidad de la infraestructura, disminuir los costos de operación y mantenimiento de los pavimentos flexibles.

1.3 Objetivo general:

Desarrollar una simulación numérica de la prueba triaxial cíclica, para obtener una aproximación de los módulos resilientes del suelo del ex Lago de Texcoco que permita evaluar el comportamiento de las deformaciones y esfuerzos de la subrasante de acuerdo a la norma AASHTO.

1.3.1 Objetivos específicos:

- ❖ Calibración numérica de diferentes suelos para obtener los parámetros de rigidez que permitan una simulación numérica de las condiciones del caso de estudio.
- ❖ Determinar la influencia y el comportamiento de diferentes rigideces del material que componen a la subrasante del suelo del ex Lago de Texcoco, para obtener una aproximación numérica de los módulos resilientes.
- ❖ Evaluar el comportamiento de las deformaciones y esfuerzos del caso de estudio para obtener el módulo de elasticidad, cohesión, ángulo de fricción y coeficiente de Poisson de diferentes pruebas triaxiales numéricas.

1.4 Propuesta metodológica

En este trabajo se propone una simulación numérica de la prueba triaxial cíclica de una muestra de suelo de subrasante que tiene como base el valor del módulo resiliente de una prueba triaxial cíclica de laboratorio.

La propuesta de solución se ha dividido en 6 etapas, en la que uno de los pasos elementales es la caracterización de la muestra de suelo de subrasante a través de sus propiedades y su clasificación SUCS, por lo tanto, como segunda etapa es analizar cómo se determina el módulo resiliente con la ayuda de la Norma AASHTO T 307-99 (2012) por medio de una prueba triaxial cíclica de laboratorio. En la etapa 3 se programa una simulación de la prueba triaxial mediante elementos finitos en la cual se configura la aplicación de esfuerzos desviadores y la presión de confinamiento, usando un modelo constitutivo "Hardening Soil" simulándose un tipo de suelo a través de parámetros de resistencia mecánica, y de deformación como son el módulo elástico y de Poisson, pasando así a la etapa 4 en donde se obtiene la calibración de suelo.

En la etapa 5 se define la simulación para diferentes suelos de subrasantes de una prueba triaxial numérica mediante el software Plaxis® por medio de la secuencia de esfuerzos aplicados a la prueba triaxial que diseñó Lerma (2017). Para terminar en la etapa 6 se evalúa la aproximación numérica del comportamiento mecanicista del suelo de subrasante basado en el módulo resiliente de una prueba triaxial de laboratorio.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone los fundamentos teóricos que describen principalmente la estructura y metodologías para diseñar un pavimento. Los esfuerzos en la base, subbase y subrasante producen asentamientos que afectan el servicio de calidad en cualquier estructura del pavimento. Por lo tanto, en caso de la subrasante el Módulo Resiliente es el parámetro utilizado con el fin de representar las propiedades de los suelos.

En este apartado es importante conocer como evaluar el parámetro del Módulo Resiliente por medio del método de elementos finitos que es necesario para realizar la evaluación numérica de la respuesta mecánica del suelo arcilloso, bajo las condiciones establecidas en la prueba triaxial.

2.1 Estructura del pavimento

El pavimento es la capa o conjunto de capas de materiales apropiados comprendidos entre la superficie de la subrasante y la superficie de rodadura, cuyas principales funciones son las de proporcionar una superficie uniforme de textura apropiada y resistente a la acción del tráfico, intemperismo y de otros agentes perjudiciales, asimismo transmitir adecuadamente al terreno de fundación los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tráfico. En otras palabras, el pavimento es la superestructura de la obra vial que hace posible el tránsito fluido de los vehículos con la seguridad, confort y economía previstos por el proyecto (Herrera M. , 2014).

La subrasante es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como Módulo de Resiliencia (M_R), Por lo tanto, las estructuras de los pavimentos son altamente determinados por la rigidez de la subrasante (Sandoval & Rivera, 2019).

A continuación, se describe la función de cada una de las capas de la estructura del pavimento según Barry R. et al. (2006):

a. Subrasante.

Una estructura de pavimento está conformada por capas de diferente espesor y calidad, que se apoyan sobre una capa de soporte conocida como subrasante (Sandoval & Rivera, 2019). Las investigaciones recientes han demostrado que la subrasante controla en general (alrededor del 80 %) las deformaciones de la estructura de pavimento principalmente para suelos finos (El Howayek, y otros, 2016).

b. Subbase.

La subbase es una capa o capas de material específico o seleccionado de espesor diseñado colocado en una subrasante para soportar el trayecto de la base. La capa de la subbase generalmente es de menor calidad que la capa base. Normalmente se incluye una capa de subbase cuando los suelos de subrasante son de muy baja calidad y/o el material adecuado para la capa de base no está disponible localmente y, por lo tanto, es costoso.

c. Base.

La base es una capa o capas de material específico o seleccionado de espesor diseñado colocado en una subbase o subrasante (si no se utiliza una subbase) para proporcionar un soporte uniforme y estable para las trayectorias de la carpeta y superficie. La capa base típicamente proporciona una porción significativa de la capacidad estructural en un sistema de pavimento flexible.

2.2 Metodologías de diseños de pavimentos

Aunque el método de diseño AASHTO fue un gran paso adelante, todavía tiene el inconveniente de ser altamente empírico. De hecho, el método es nada menos que un conjunto de ecuaciones de regresión que son válidas para las condiciones específicas (clima, tráfico, materiales, etc.) de una carretera. (Molenaar, 2018).

Las características claves de estas metodologías de diseño se describen en las siguientes subsecciones.

2.2.1 Boussinesq y Burmister

La teoría de Boussinesq (1885) es la formulación más básica que se utiliza para el análisis de pavimentos. Consiste en el cálculo de la distribución de esfuerzos al aplicarse una carga concentrada en la superficie de una masa de suelo, homogéneo e isotrópico de dimensiones semi-infinitas.

El modelo elástico lineal que ha sido desarrollado por Boussinesq es un modelo analítico simple en el que se supone que el material es isotrópico y homogéneo. El modelo elástico lineal los esfuerzos horizontales, verticales, normales y de corte pueden calcularse suponiendo que el material es completamente elástico con una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, por lo tanto, se puede describir completamente utilizando dos parámetros elásticos, como el módulo elástico y la relación de Poisson (Boussinesq, 1885).

Después de eso, el modelo de Boussinesq ha sido mejorado por el trabajo de Burmister (1945). Burmister extendió la teoría de Boussinesq de una sola capa a un modelo elástico multicapa (Burmister & et al., 1943). Burmister introdujo el uso de la teoría elástica multicapa para analizar estructuras de pavimento. Su modelo representaba las diferentes capas con diferentes módulos de elasticidad y relación de Poisson (Burmister, 1945).

2.2.2 Guía de diseño de pavimento AASHTO de 1993

La Guía de diseño de pavimento AASHTO de 1993 recomienda utilizar M_R como parámetro de entrada para evaluar el soporte de subrasante. El módulo resiliente se define, como aquel que relaciona las tensiones aplicadas y las deformaciones recuperables, acepta obtener el módulo elástico de la subrasante a partir de correlaciones con propiedades como contenido de finos, contenido de humedad, índice de plasticidad, límite líquido, entre otras (AASHTO, 1993).

La caracterización del suelo subrasante, en términos de módulo resiliente, es crucial tanto para el diseño de pavimento rígido como flexible (A.M & K.P, 2005).

La Guía de AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento (1993), además de otras revisiones, incorporó el concepto de módulo elástico (M_R) para caracterizar los materiales de pavimento, incluido el subsuelo, sometidos a tráfico móvil. El M_R de la subrasante depende principalmente de tres factores: (a) condiciones de carga o estado de esfuerzos, (b) tipo y estructura del suelo y (c) propiedades físicas del suelo (Li y Selig 1994) (A.M & K.P, 2005).

2.2.3 Módulo Resiliente

El módulo elástico de los materiales del pavimento es un parámetro esencial para una base mecánica del procedimiento de diseño de pavimento, especialmente para capas de material granular y generalmente se considera como una medida adecuada de rigidez para materiales de pavimento no unidos (Ahmed & Elsanabary, 2013).

El concepto de módulo resiliente se basa en que, bajo distintos estados de tensiones (combinaciones de esfuerzo desviador y presión de confinamiento), el suelo alcanzará una deformación total con una componente elástica, recuperable o resiliente, y otra plástica, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del material. Esto permite establecer la presunción de que, siempre y cuando el esfuerzo desviador no supere la tensión de corte, luego de un gran número de repeticiones la única componente de la deformación es elástica, como se observa en la Figura 2.1 (Brizuela, Alderete, & Rivera, 2013).

Se introdujo el término módulo resiliente como la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (Rondón & Reyes, 2007).

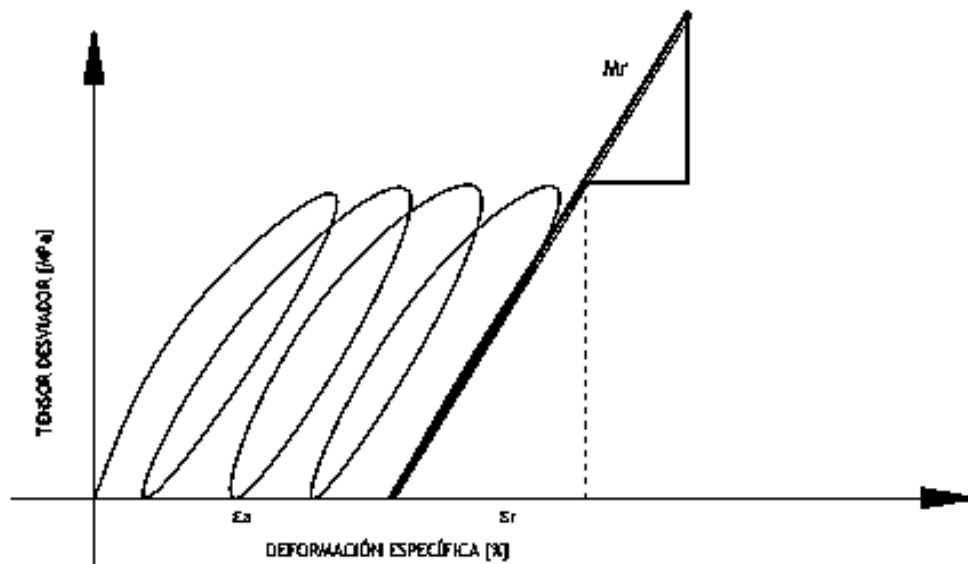


Figura 2.1: Definición del Módulo Resiliente.

Matemáticamente la ecuación del módulo resiliente está dada por:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

M_r = Módulo Resiliente

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador dinámico.

ϵ_r = Deformación unitaria recuperada.

σ_1 = Esfuerzo axial. Esfuerzo principal mayor.

σ_3 = Presión de confinamiento. Esfuerzo Principal menor.

El módulo resiliente (MR) se ha utilizado para caracterizar el comportamiento de esfuerzo-deformación de la subrasante sometidos a cargas de tráfico repetidas. Recientemente, el procedimiento de prueba triaxial repetido se ha actualizado a través del AASHTO T 307 (Daehyeon & Jong Ryeol, 2006).

Las deformaciones del pavimento bajo los esfuerzos ocasionados por las repeticiones de cargas del tráfico son las que definen el deterioro y la funcionalidad de la estructura. Por tal razón, la rigidez elástica es la propiedad más importante para la caracterización de los materiales de las capas del pavimento, incluida la subrasante (Sandoval & Rivera, 2019).

I. Deformación permanente

La deformación permanente es la deformación vertical residual que se va acumulando debido al paso de los vehículos la cual puede generar fallas estructurales o funcionales en el pavimento. En el caso de las estructuras flexibles, la deformación permanente total es la suma de la deformación producida en cada una de las capas del pavimento, pero actualmente los métodos empíricos suponen que tal deformación se genera solo en la capa subrasante y esto crea una de sus principales limitaciones. La anterior suposición se basa en que la subrasante es la capa más susceptible a la deformación debido a su más baja rigidez (en comparación con las otras capas del pavimento) y a una mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua (lo cual disminuiría su capacidad portante) (Batista, 2014).

(Uthus, 2007), enfatiza que la teoría de la elasticidad define tradicionalmente las propiedades elásticas de un material por el módulo de elasticidad, E , y la relación de Poisson, ν .

Una prueba de módulo elástico es, en principio, no destructiva, ya que la mayoría de las deformaciones se recuperan. Para este tipo de pruebas, se puede usar la misma muestra varias veces. Sin embargo, para altos niveles de tensión, se producirán algunas deformaciones permanentes.

Las deformaciones permanentes representan la parte no recuperable de las deformaciones. La deformación plástica se acumula a medida que la carga continúa hasta que el material se reorganiza en una estructura más fuerte o se produce una falla (Uthus, 2007).

La deformación en materiales granulares no unidos bajo carga cíclica se divide en una parte elástica (recuperable) y una parte de plástico que no se recupera. La deformación elástica representa el denominador en el módulo elástico y la deformación no recuperable da como resultado deformaciones permanentes a lo largo del tiempo.

Aunque las deformaciones permanentes no influyen inmediatamente en la capacidad de soporte del pavimento, se sabe que pueden acortar significativamente su vida efectiva, además de causar una pérdida importante en la calidad de servicio de la vía.

I. Deformaciones resilientes (elásticas)

Se presentan cuando las deformaciones se recuperan de manera instantánea en el momento que la carga deja de actuar; mientras que las deformaciones permanentes se presentan después de la aplicación de la misma y son acumulativas (Pandaes & Pedroza, 2009).

Las deformaciones elásticas son importantes para las capas superiores de la estructura de pavimento como la carpeta asfáltica y bases estabilizadas, debido a que éstas se ven sometidas a grandes esfuerzos repetidos y producidos por el tráfico vehicular, que generan niveles de deformación muy altos y provocan fallas por fatiga cuando las capas del pavimento son muy rígidas (Hidalgo & Rodríguez, 2004).

Es la deformación elástica o resilientes de las capas del pavimento y de la subrasante que condiciona la fatiga de las capas superficiales más resistentes, sujetas a flexiones sucesivas, según Medina y Motta (2015).

2.2.3.1 Factores que afectan el Módulo de Resiliencia

Para determinar el efecto que tiene algunos factores en el módulo de resiliencia, se resumen algunos de los factores reportados en la literatura, mediante el estudio del modelo para estimar el módulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición óptima de compactación del autor Pérez, Garnica & et al., (2016).

a) Condiciones físicas del suelo

Al aplicar ciclos de carga en materiales de baja permeabilidad, como lo son los suelos finos, se genera presión de poro que disminuye los esfuerzos efectivos del suelo, por lo que la deformación permanente aumenta, haciendo así, que, a mayor contenido de agua, el M_R disminuya (Khoury & Zaman, 2004).

El módulo de resiliencia de los suelos de subrasante se reduce con el incremento en contenido de agua o grado de saturación. Esto obliga hacer ajustes de los valores del módulo cuando el pavimento se satura en determinados períodos (Morales, Chávez, & López, 2009). Por otro lado, el peso volumétrico también es una de las variables que afectan el M_R , por lo que se puede decir que un incremento en densidad incrementa el módulo de resiliencia, sin embargo, el efecto es menor que el del contenido de agua.

(Andrei et al, 2009), encontraron que a variaciones de humedad entre el 3 - 5% se produce una reducción de módulo entre el 50-70%. Incluso en materiales granulares, sucede el mismo efecto, tal como lo reporta (Tiam, 1998) el cual utilizo materiales granulares de Oklahoma y en una granulometría varió el contenido de agua a 2% por debajo y por encima de la óptima de compactación, encontrando la disminución del módulo al aumento de la humedad.

b) Condiciones de esfuerzo

El M_R es una propiedad que depende del estado de esfuerzos. Un incremento en el esfuerzo desviador resulta en un decremento en el módulo de resiliencia de suelos cohesivos y un incremento en el confinamiento.

El esfuerzo de confinamiento es una variable de gran influencia sobre el módulo de materiales finos, sobre todo en las arcillas, sin embargo, el efecto producido por el esfuerzo desviador es de mayor consideración. El estado de esfuerzos del suelo depende también del número de ciclos de carga. Lo contrario sucede en materiales granulares, para los cuales, el M_R aumenta con el incremento de esfuerzos (Rojas , 2014).

c) Influencia del contenido de finos

El M_R tiende a disminuir con el aumento del contenido de finos (Pandaes & Pedroza, 2009). Sin embargo, esta tendencia no es generalizada y depende mucho del tipo del material estudiado como lo dan a conocer los autores Rondón y Reyes, (2007).

d) Método de compactación

Compactar significa romper la estructura original del suelo y modificarlo para generar suelos más densos. El método de compactación depende de la naturaleza propia del suelo.

El arreglo que tomen las partículas al ser compactadas depende en cierto modo del grado de saturación. Por ejemplo, para bajos grados de saturación, las partículas de los suelos finos, se reacomodan al azar formando lo que se llama una estructura floculada, en cambio, para altos de grados de saturación, las partículas tienden a acomodarse en forma paralela generando lo que se conoce como una estructura dispersa (Rojas , 2014).

En cuanto al M_R , los métodos de compactación producen diferencias en las resistencias alcanzadas sobre todo en los suelos plásticos y compactados con humedades superiores a las óptimas. Se reporta entonces, que los módulos alcanzados por compactación estática son mayores que los obtenidos por amasado (Garnica Anguas et al 2002). (Garnica Anguas & Gómez López, 2001).

e) Otros factores

Otros factores que tienen influencia en el módulo son: el tipo de suelo, límites de consistencia, método de reparación de la muestra, tamaño de la muestra, granulometría, ciclos de congelamiento y deshielo, etc.

Garnica et al. (2001) en la publicación No. 142 del IMT, dan a conocer que los factores que afectan también al módulo resiliente en suelos cohesivos, dependen de las condiciones de compactación, del número de ciclos aplicado y es afectado por el fenómeno de tixotropía y para suelos granulares influye la naturaleza de los agregados, el grado de solidez, forma de la partícula, composición granulométrica, contenido de agua y peso volumétrico.

2.2.4 Método de Elementos Finitos

En la actualidad existen diferentes softwares que permiten realizar el diseño de estructuras de pavimentos a partir de la teoría de elementos finitos, mecánica del medio continuo y métodos de análisis aproximado (Reyes & Camacho, 2004).

El Método del Elemento Finito (FEM, abreviatura en inglés), ha adquirido una gran importancia ya que permite resolver casos que hasta hace algún tiempo atrás eran prácticamente imposibles de resolver por los métodos experimentales. Esta circunstancia obligaba a realizar

prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado costo, tanto económico como el tiempo de desarrollo (Admed y Elsanabary, 2013).

El Método del Elemento Finito (FEM), según Portillo (2008), consiste en la división del modelo a ser analizado en cuerpos discretos o elementos finitos, a los cuales se les definen sus propiedades mecánicas y térmicas. Es decir, divide la estructura compleja en partes pequeñas, luego analiza las partes pequeñas, luego analiza las partes pequeñas y al sumar la solución de las partes pequeñas se puede obtener la solución aproximada general de la estructura compleja (Mahmoud & Ahmed, 2015).

El objetivo del FEM es desarrollar una solución numérica para problemas de ingeniería complejos, es decir, se fundamenta en la resolución de problemas mediante su modelamiento numérico con ecuaciones diferenciales y su solución mediante sistemas de matrices (Rios, 2003), especialmente con la ayuda de un software informático (Mahmoud & Ahmed, 2015). Cui et al., (2006) consideran que el FEM representa con mayor precisión el fenómeno físico real de la interacción neumático-suelo que los modelos empíricos o analíticos.

La utilización de programas de elementos finitos y análisis numérico viene siendo ampliamente aplicada en el diseño y análisis racional de estructuras de pavimentos. En esta metodología se requiere un conocimiento del módulo de elasticidad y relación de Poisson en las diferentes capas que conforman la estructura para la determinación de esfuerzos y deformaciones (Pandales & Pedroza, 2009).

Estas nuevas metodologías se han visto beneficiadas con el desarrollo de la tecnología y la capacidad de las computadoras, programas de elemento finito como el ABAQUS, PLAXIS y ANSYS (Leiva, Loria, & Navas, 2011).

2.2.4.1 Programa Plaxis

PLAXIS es un programa de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con asimetría. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate (Pandales & Pedroza, 2009).

Los autores Pandales y Pedroza (2009), en su estudio “Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento” dan a conocer los diferentes modelos que se obtienen cuando se lleva a cabo el Método de Elementos Finitos y como está compuesto, los cuales son los siguientes:

- ✚ Modelo físico. Objeto de estudio, el cual es el punto de partida para el análisis.
- ✚ Modelo matemático. Aproximación del comportamiento del sistema mediante ecuaciones diferenciales.
- ✚ Modelo discreto. Modelo elaborado en el programa de simulación, el cual es una representación que incluye la geometría, cargas aplicadas, restricciones, elementos para el enmallado y las características del material.
- ✚ Solución discreta. Conjunto de resultados que arroja el programa de una variable en particular, con base en el cual se calculan los demás parámetros a estudiar.

Los programas elásticos multicapas han sido preferidos con respecto a los de elementos finitos debido a su simplicidad en el manejo y en el entendimiento de las ecuaciones con las que se obtienen los estados de esfuerzo y deformación. Pero en general, los programas de elementos finitos son mejores para intentar reproducir el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman un pavimento. Solo es necesario el desarrollo de ecuaciones constitutivas que predigan lo más cercano posible el comportamiento de cada uno de los materiales que conforman estas estructuras (Rondón & Reyes, 2007).

2.2.5 Modelos constitutivos

El módulo elástico, M_R , es una propiedad mecánica de los materiales de pavimento no unidos que depende en gran medida del nivel del esfuerzo aplicado. Por lo tanto, la relación esfuerzo-deformación debe modelarse con la mayor precisión posible con leyes constitutivas (Erlingsson, 2014).

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 (González, Herrera, Iglesias, & López, 2013).

El comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos es complejo, difícil de describir por relaciones matemáticas simples. Este hecho se debe en parte a que, bajo compresión el suelo desarrolla al mismo tiempo deformación elástica y deformación plástica (Chi et al., 1993).

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

- ✚ Modelos lineales o no lineales; en dependencia de la linealidad de la ecuación.
- ✚ Modelos elásticos, plásticos y elastoplásticos; en dependencia de si se considera en el modelo sólo deformación elástica, plástica o ambas.
- ✚ Modelos estáticos o dinámicos (reológicos); en dependencia de si el tiempo se tiene en cuenta en el modelo.

Un material se considera elástico si las fuerzas externas aplicadas provocan deformaciones que no excedan ciertos límites; y retirar las cargas actuantes todas las deformaciones desaparecen, recuperando completamente su estado inicial; bajo el supuesto de que es homogéneo e isotrópico. La no linealidad implica que los parámetros elásticos no son constantes, sino que dependen del estado esfuerzo-deformación del suelo (Gonzalez, Herrera, & al., 2013).

2.2.5.1 Modelo Mohr-Coulomb

Mohr-Coulomb es un modelo elástico de plasticidad perfecta, desarrollado a partir de la ley de elasticidad de Hooke a menudo se usa para modelar el comportamiento del suelo en general y sirve como modelo para primer orden. Este modelo describe el comportamiento de arenas sueltas y arcillas normalmente consolidadas, que implican una superficie de deformación única y fija asociada con deformaciones plásticas irreversibles (Nieto, Camacho, & Ruiz, 2009).

En el estado de esfuerzo general, el esfuerzo-deformación del modelo se comporta linealmente en el rango elástico, con dos parámetros definitorios de la ley de Hooke (módulo de Young, E y relación de Poisson, ν). Hay dos parámetros que definen los criterios de falla (el ángulo de fricción, ϕ y la cohesión, c) y también un parámetro para describir la regla de flujo (ángulo de dilatación, ψ que proviene del uso de una regla de flujo no asociada que se usa para modelar un cambio irreversible realista en el volumen debido al corte) (Bujang, Jamaluddin, & Moh'd).

En PLAXIS, la formulación básica requiere cinco parámetros básicos: Módulo E de Young, relación de Poisson ν , cohesión c , ángulo de fricción ϕ y ángulo de dilatación ψ . Mohr-Coulomb es ampliamente utilizado en ingeniería geotécnica para determinar la resistencia al corte, aunque

el modelo no considera los efectos bajo diferentes trayectorias de esfuerzo (Camacho, Molina, & Reyes, 2015).

I. Parámetros de resistencia:

a) Ángulo de fricción (φ)

El ángulo de fricción es uno de los parámetros más comunes en la mecánica de suelos y es utilizado para numerosos procedimientos de diseño de fundaciones y otras estructuras geotécnicas. En general, el ángulo φ hace referencia a la medida de la resistencia cortante debida a la fricción mecánica directa entre las partículas de suelo (M. Budhu, 2007).

El valor del ángulo de fricción caracteriza notoriamente a cada tipo de suelo, y puede ser determinado a partir de procedimientos de laboratorio y de campo, a través de correlaciones y gráficos; y si no cuentan con ninguna otra información puede obtenerse a partir de tablas. En este sentido, la prueba triaxial es uno de los ensayos más adecuados para evaluarlo mediante la representación gráfica del criterio de falla Mohr-Coulomb (Nieto, Camacho, & Ruiz, 2009).

b) Cohesión (c)

La resistencia por cohesión es definida como la medida de las fuerzas que cementan las partículas del suelo (M. Budhu, 2007). La cohesión del suelo puede ser establecida a partir de variados procedimientos; sin embargo, a partir de la información disponible de los ensayos triaxiales ejecutados y del trazado de la envolvente de falla del suelo, esta puede ser determinada como el intercepto de la línea de falla con el plano vertical (Nieto, Camacho, & Ruiz, 2009). Un valor típico de la cohesión para arcillas normalmente consolidadas es cero (M.D.Braja, 2001).

c) Ángulo de dilatancia (ψ)

El cambio de volumen del suelo durante el proceso es agrupado por el parámetro físico conocido como dilatancia (Hernández & Poveda, 2013). El ángulo de dilatancia puede tener una influencia significativa en la modelación del comportamiento del suelo, especialmente en arenas densas y arcillas altamente sobreconsolidados del suelo.

II. Parámetros elásticos:

a) Módulo de Young (E)

El módulo de Young representa la rigidez del material. Describe la relación lineal del comportamiento de esfuerzo-deformación del material bajo cargas estáticas y monotónicas en la etapa elástica antes de alcanzar el límite elástico (Ahmed & Elsanabary, 2013).

Plaxis usa el módulo de Young como un módulo de rigidez, y dado el comportamiento no lineal típico de los suelos normalmente consolidados, no es conveniente usar el módulo de rigidez tangente a la parte inicial de la curva de deformación (zona elástica) sino que se recomienda usar el módulo de rigidez correspondiente a la pendiente de la recta entre el origen y el punto correspondiente al 50% de la resistencia máxima. Este módulo de Young es denotado como E_{50} y es el más indicado para representar dicha respuesta.

b) Relación de Poisson (ν)

Se trata de uno de los parámetros más difíciles de evaluar en el contexto de la mecánica de suelos, pero al mismo tiempo, de uno de los más relevantes en el análisis numérico por elementos finitos y particularmente en el modelo Mohr-Coulomb. Normalmente, la relación de Poisson efectiva puede ser evaluada a través de la realización de un ensayo triaxial drenado, midiendo las distintas variables de deformación unitaria.

2.2.5.2 Modelo Hardening Soil

El modelo Hardening Soil (Brinkgreve & Vermeer, 1997; Schanz, 1998) es un verdadero modelo de segundo orden para suelos en general (suelos blandos y tipos de suelo más duros), para cualquier tipo de aplicación (Brinkgreve, 2005).

El modelo implica endurecimiento por fricción para modelar la deformación plástica de corte en la carga desviadora y en el límite de endurecimiento para modelar la deformación volumétrica plástica en compresión primaria.

Se puede hacer una distinción entre dos tipos principales de endurecimiento, a saber, el endurecimiento por corte y el endurecimiento por compresión. El endurecimiento por corte se usa para modelar esfuerzos irreversibles debido a la carga desviadora primaria. El endurecimiento por compresión se usa para modelar deformaciones plásticas irreversibles debido a la compresión primaria en la carga del edómetro y la carga isotrópica (Bujang, Jamaluddin, & Moh'd).

El modelo de endurecimiento al igual que el modelo Mohr-Coulomb considera como parámetros elásticos básicos el ángulo de fricción interna ϕ' , la cohesión c' y el ángulo de dilatación ψ' .

III. Parámetros de rigidez

a) Dependencia al estado de esfuerzos (m)

La dependencia de los parámetros de rigidez respecto a un estado general de esfuerzos es una característica básica del modelo Hardening Soil, en la que se relacionan los valores del módulo de Young E_{50} . Normalmente, para arcillas la dependencia a los esfuerzos es lineal, lo que equivale a $m=1$ (Nieto, Camacho, & Ruiz, 2009).

b) Módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref})

De acuerdo con la consideración de la dependencia al estado de esfuerzos contenida en el modelo de endurecimiento, un parámetro global es definido para modelar el comportamiento referente a la rigidez básica del suelo E_{50}^{ref} .

c) Módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref})

El módulo de rigidez edométrico se obtiene generalmente de la realización de un ensayo de consolidación unidimensional (línea tangente al nivel de esfuerzos de referencia).

d) Módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref})

Este parámetro hace referencia a la rigidez del suelo cuando es sometido a trayectorias de recarga-descarga, y en general para suelos arcillosos corresponde a tres veces el modelo secante de referencia: ($E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$).

Capítulo 3

Estado del arte

En esta sección se presentará el análisis del estado del arte, en donde se citan las investigaciones más relevantes en relación a los modelos constitutivos del método de elementos finitos, principalmente su aplicación en una prueba triaxial y conocer cada uno de los elementos que la constituyen. Así como también el conocimiento de cómo se obtiene el módulo resiliente de un suelo de subrasante.

3.1 Método experimental

El método del módulo resiliente cubre los procedimientos normalizados para la determinación del módulo elástico dinámico o de resiliencia de los suelos, en la que se realiza por medio de la prueba triaxial. El ensayo de módulo resiliente proporciona la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación de los materiales de construcción de pavimentos flexibles para su empleo en el análisis del sistema de capas en pavimentos y proporciona un medio de evaluación de los materiales de construcción de pavimentos, incluyendo suelos de subrasante, bajo una variedad de condiciones ambientales y de estado de esfuerzos, que simulan realísticamente las situaciones existentes en pavimentos sometidos a cargas móviles del tránsito (NORMA INV. E-156-07).

3.1.1 Norma AASHTO T 307-99 (2012)

Actualmente, el módulo resiliente se determina con base a la norma AASHTO T 307-99 (2012): “Determinación del Módulo Resiliente de Materiales de Suelos y Agregados”, consiste básicamente en someter a una probeta del material a un estado de esfuerzo compuesto por una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador dinámico representativas de los esfuerzos que puede experimentar una subrasante de un pavimento en servicio. Los estados de esfuerzos ensayados dependen si el material va a ser utilizado como base, subbase o subrasante (Chaves, 2017).

El procedimiento de elaboración de la prueba del módulo de resiliencia para suelos finos y materiales granulares, los cuales son definidos como materiales tipo 1 y tipo 2 respectivamente. La ejecución de esta prueba se lleva a cabo en una cámara triaxial capaz de aplicar cargas cíclicas y consiste en aplicar a un espécimen de suelo formado en laboratorio o proveniente de un muestreo inalterado, una secuencia de carga cíclica de tipo haversiano, seguida de un periodo de reposo.

El estado de esfuerzo pretende reproducir el estado al que se encuentra el suelo de cimentación o los materiales que conforman las capas granulares de un pavimento, cuando éste es solicitado por una carga de tránsito. Las condiciones de tránsito son simuladas mediante la aplicación de una serie repetida de esfuerzo desviador, separados por periodos de descanso, y las condiciones de campo son simuladas por acondicionamiento y post-condicionamiento de la probeta.

La idea de este ensayo es emular las condiciones reales en que va a estar el suelo a la hora de ser sometidos a cargas, por lo que se trata de controlar los principales factores que influyen en el módulo resiliente (Chaves, 2017).

El valor de módulo resiliente determinado por este ensayo es una medida del módulo elástico de suelos considerando la variación no lineal de este valor con cambios en la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador. A partir de estas mediciones se pueden calibrar los coeficientes de los modelos constitutivos de módulo resiliente para poder predecir su valor a cualquier estado de esfuerzo (Chaves, 2017).

La aplicación de carga se realiza de tal forma que se simulen los esfuerzos estáticos del suelo en la capa de subrasante, así como las cargas cíclicas superpuestas por los vehículos. Esto se logra por medio de la cámara triaxial que aplica distintas presiones de confinamiento y un sistema de carga axial que aplica un esfuerzo desviador de forma cíclica con el fin de simular el paso de los vehículos.

En general el módulo resiliente de un suelo determinado de pruebas de laboratorio, depende de muchos factores incluyendo, el contenido de agua, el peso volumétrico seco, el esfuerzo desviador y de confinamiento, el tamaño y preparación del espécimen, la forma del pulso, duración, frecuencia y secuencia de los niveles de esfuerzo, el equipo de ensaye y el método de acondicionamiento, (Mohammad et al., 2003).

3.2 Método experimental-numérico

Los métodos numéricos parten de la definición o empleo de un modelo que describe, mediante relaciones matemáticas, las leyes que rigen el fenómeno físico a investigar en cuestión; los mismos resultan muy económicos y confiables, a partir de que se establece o corrobora que el modelo proporciona resultados reales durante su aplicación (Herrera & et al., 2008).

Camacho J. et al. (2015), el propósito de su investigación fue evaluar el efecto de la carga dinámica del tráfico en un terraplén de carretera utilizando el método de elementos finitos con diferentes modelos de suelo constitutivos, emplearon tres muestras para realizar la prueba triaxial sin drenaje no consolidado (ASTM D 2880).

Desarrollaron un programa experimental para medir las propiedades elásticas y la resistencia al corte de una base granular mediante el uso de una trayectoria triaxial convencional de esfuerzo con sensores locales y pruebas de columna resonante. Todos los parámetros que utilizaron en las simulaciones numéricas los obtuvieron completamente de forma experimental.

Crearon un modelo 2D de elementos finitos dinámicos en PLAXIS® para estimar las deformaciones acumulativas producidas por una carga de movimiento repetitivo en un segmento de carretera. Se utilizaron tres modelos constitutivos diferentes: Mohr-Coulomb, Hardening Soil y Hardening Soil Small Strain.

Hernández y Poveda (2013) desarrollaron un proyecto basado en los modelos constitutivos Mohr-Coulomb y Hardening Soil, obteniendo y analizando los parámetros necesarios para la simulación del ensayo triaxial.

Surarak C. et al. (2021), analiza un conjunto completo de datos experimentales sobre el subsuelo de Bangkok a partir de pruebas edométricas y triaxiales con el fin de determinar los parámetros de rigidez y resistencia para el modelo de Hardening Soil. Por lo tanto, realizan el modelado de elementos finitos de las pruebas triaxiales y edométricas para calibrar y verificar los parámetros de rigidez determinados a partir de las pruebas de laboratorio.

Los diferentes modelos de estudio poseen el mismo comportamiento de la prueba experimental, con la diferencia que el modelo Mohr Coulomb se comporta con un modelo elástico constante antes de la falla y luego plástico perfecto y el modelo Hardening Soil, tiene un módulo que va cambiando con el nivel de deformación, y permite tener en cuenta la historia del material (si es normalmente consolidado o sobreconsolidadas) y por tanto dependiendo del modelo utilizado tendrá un comportamiento volumétrico diferente.

No obstante, los modelos Mohr Coulomb y Hardening Soil, anticipan adecuadamente la resistencia pico del suelo, es decir, los dos modelos concuerdan con el esfuerzo de falla para las simulaciones realizadas, el modelo Mohr Coulomb llega al valor de la resistencia adecuado sin embargo lo hace a un nivel de deformación que es mucho menor que el que se obtuvo experimental, por tanto, no predice adecuadamente el comportamiento de deformación de la muestra, se aconseja el uso del modelo Hardening Soil dado a la contemplación de la variación de la rigidez dependiente del estado de esfuerzos y a la correlación hiperbólica implícita en su formulación.

Al hacer variaciones de cada uno de los parámetros obtenidos, se dan como resultado variaciones que permiten un análisis más preciso de la exactitud con la que se trabaja el software, y del comportamiento de las muestras simuladas, y las tendencias que representa el modelamiento del ensayo triaxial.

En la tabla 3.1 se resume las partes fundamentales de las investigaciones más relevantes, en la que los autores trabajan con los modelos constitutivos y principalmente con la prueba triaxial.

NOMBRE	SECCIÓN	TIPO DE SUELO	TIPO DE MODELO		PARÁMETROS	PRUEBAS	MÉTODO DE ANÁLISIS
			EXPERIMENTAL	NUMÉRICO			
Norma AASHTO T 307-99 (2012)	Subrasante	Suelos cohesivos Suelos granulares	●		Módulo Resiliente	Prueba triaxial	
Camacho, J., Molina, F., y Reyes, O. (Noviembre de 2015) [4].	Terraplén	Suelo granular	●	●	Resistencia al corte y módulos elásticos	Prueba triaxial	Modelos constitutivos
Hernández y Poveda (2013)	Obras de infraestructuras	Arena arcillosa	●	●	Parámetros básicos de Mohr Coulomb y Hardening Soil	Prueba triaxial	Modelos constitutivos
Chanaton Surara et al. (2012)	Subrasante	Arena arcillosa	●	●	Parámetros básicos de Hardening Soil	Prueba Triaxial	Modelos constitutivos
De León, Morales y Equihua (2021)	Subrasante	Arena arcillosa		●	Parámetros básicos de Hardening Soil	Prueba Triaxial numérico	Modelos constitutivos

Tabla 3.1: Estado del arte de los modelos constitutivos.

3.3 Evaluación y determinación del módulo resiliente de la subrasante

En el diseño de pavimentos, el parámetro primordial es el módulo resiliente (M_R), el cual, es un parámetro dinámico que caracteriza la deformabilidad de las capas granulares y de suelo de subrasante (Romero, 2018). Los autores Yoder y Witczak señalan que “Todos los pavimentos derivan su último apoyo del suelo de subrasante, por lo tanto, es esencial tener un conocimiento claro de la mecánica de suelos”.

En la ingeniería de pavimentos, excepto en situaciones de pavimentos con muy baja rigidez, el suelo está sujeto a un entorno de esfuerzo controlado. Esto significa, que la deformación que se desarrolla en el suelo depende del esfuerzo aplicado y de la rigidez del suelo.

La resistencia al esfuerzo cortante de subrasante indica cuál es su capacidad máxima de carga. Por otra parte, la rigidez o deformabilidad de un material de subrasante determina en gran parte la deformación y los desplazamientos del pavimento, durante el proceso de carga y descarga debido al paso de vehículos.

El complejo patrón de cargas dinámicas que resiste un pavimento, genera deformaciones relevantes en los materiales tanto en el rango elástico como en el rango plástico. Estas deformaciones juegan un papel importante en el desempeño de la estructura del pavimento, por lo que es imprescindible controlar las deformaciones y esfuerzos que llegan a la subrasante, mediante la conformación de modelos multicapas que impiden el reflejo de los esfuerzos a la subrasante (Rojas , 2014).

3.3.1 Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del ex Lago de Texcoco

Gran parte de la actual Ciudad de México se encuentran ubicadas sobre la zona que fue ocupada por el ex lago de Texcoco, en su mayoría por arcillas con características excepcionales, que basadas en un punto de vista geotécnico, presenta una gran compresibilidad y una baja resistencia al esfuerzo cortante.

El módulo dinámico equivalente (E_{eq}), se define como la pendiente del ciclo histórico encontrado en el comportamiento esfuerzo-deformación axial de las muestras sometidas a carga o deformación cíclica. Este parámetro varía con el esfuerzo desviador y con la deformación unitaria axial, (Córdoba, C. G., 1986).

El proyecto que realizó Romero (2018) fue de forma experimental mediante pruebas triaxiales cíclicas a distintos niveles de esfuerzo desviador y esfuerzo efectivo medio para determinar la relación entre el módulo dinámico equivalente (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_R). Al comparar estos módulos resultó una relación lineal entre ellos y ambos son similares en los niveles de esfuerzo desviador y efectivo inducidos.

Para un mismo nivel de esfuerzo efectivo de consolidación aplicado, al aumentar la deformación unitaria axial provocada por el incremento de esfuerzo desviador, el valor de módulos obtenidos será menor. Por su parte, para un mismo nivel de esfuerzo desviador, al incrementarse el esfuerzo efectivo de consolidación la deformación unitaria axial disminuye y, por lo tanto, el valor de los módulos aumenta.

Romero (2018) concluyó que la magnitud de ambos módulos aumenta en forma exponencial y disminuye la relación de vacíos, en las distintas etapas de carga y descarga del suelo respectivamente. Al igual que para el esfuerzo efectivo, no se podrá establecer una tendencia general de los módulos con la relación de vacíos.

A menor índice de plasticidad de los suelos, los módulos E_{eq} y M_R resultan mayores como consecuencia del incremento de la rigidez del suelo. La tendencia, tanto para los suelos arcillosos como limosos, es potencial y se mantiene para todos los niveles de esfuerzo medio aplicado.

Observaron una relación de los módulos con respecto a la densidad relativa de sólidos; a mayor densidad de sólidos de la muestra de suelo, mayor es la magnitud de los módulos E_{eq} y M_R , tanto en condiciones no consolidadas no drenadas (UU) como en condiciones consolidadas drenadas (CU).

3.3.2 Determinación del módulo de resiliencia de las arcillas del ex Lago de Texcoco

Los resultados de todas las pruebas de módulo resiliente indican que la deformabilidad del suelo depende del grado de saturación del suelo, el esfuerzo de confinamiento (condición no consolidada), esfuerzo efectivo promedio (condición consolidada), relación de vacíos inicial, deformación vertical inducida y la magnitud del esfuerzo desviador cíclico.

La influencia del esfuerzo de confinamiento (σ_3) y el grado de saturación en pruebas no consolidadas no drenadas (UU), obedece que, durante cada cambio de esfuerzo de confinamiento en la probeta, expulsa cierta cantidad de aire alojado en su interior, y en consecuencia se genera

un aumento del grado de saturación condición que favorece el aumento en la deformabilidad del suelo.

La influencia del esfuerzo efectivo promedio σ' en las pruebas consolidadas no drenadas, identificaron que el módulo de resiliencia del suelo aumenta en la medida que se aplica un esfuerzo efectivo promedio mayor (Lerma T., 2017).

A medida que aumenta el esfuerzo desviador cíclico (σ_d) el M_R disminuye, este comportamiento ocurre bajo condiciones no consolidadas y consolidadas.

La deformación en las probetas disminuye conforme aumenta el esfuerzo promedio σ' durante el ensayo. En condiciones UU, los valores del módulo de resiliencia no tienen mayor variación con respecto a la deformación unitaria en las probetas. Para condiciones consolidadas no drenadas (CU), el rango de la deformación unitaria se reduce significativamente conforme aumenta el esfuerzo promedio σ' . En condiciones CU, las probetas redujeron su contenido de vacíos provocando un aumento en su rigidez, y una disminución en su deformación unitaria (ϵ).

Las deformaciones en estas condiciones disminuyeron conforme aumentaba el esfuerzo de consolidación de las probetas. Al aumentar la deformación unitaria en las probetas, los valores del M_R disminuyeron sistemáticamente pese a que el cambio no es muy significativo.

Existe una relación exponencial entre los valores de M_R y la relación de vacíos, los valores de este último parámetro aumentan conforme es mayor el esfuerzo efectivo, de esta manera es posible definir una correlación entre la relación de vacíos y los valores de M_R para cada esfuerzo efectivo promedio evaluado.

Capítulo 4

Simulación numérica de la prueba triaxial cíclica

En el presente capítulo se desarrolla la descripción teórica de los fundamentos de la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica a partir de una prueba triaxial experimental. En el primer paso se da la selección de la muestra de suelo de la capa subrasante, en el siguiente paso es la caracterización, procedimiento e importancia de la prueba del módulo resiliente mediante la norma AASHTO T 307-99.

Se continua con la descripción de cada una de las partes del método de elementos finitos para reproducir el ensayo de compresión triaxial en el software de análisis por elementos finitos Plaxis. Este procedimiento se da a partir de los siguientes pasos: introducción de datos, realización de cálculos, obtención de resultados y curvas.

Seguidamente se explica cada uno de los apartados que son: la calibración del suelo, la simulación de la prueba triaxial numérica y la evaluación de las deformaciones y módulos resilientes.

4.1 Descripción de la metodología

Los estudios recientes han demostrado que la subrasante controla alrededor del 80% de las deformaciones de las estructuras del pavimento (El Howayek, y otros, 2016). Las deformaciones del pavimento bajo los esfuerzos ocasionados por las repeticiones de cargas del tráfico son las que definen el deterioro y la funcionalidad de la estructura. Por lo tanto, la rigidez elástica es la propiedad más importante para la caracterización de los materiales de las capas del pavimento, incluida la subrasante (Sandoval & Rivera, 2019).

Los ensayos de compresión triaxial son una excelente alternativa a nivel de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas de los suelos. Asimismo, se utilizan para medir el módulo resiliente de los suelos de la subrasante. Estas pruebas se realizan sobre un rango de esfuerzos verticales y presiones de confinamiento para evaluar el comportamiento elástico no lineal de los suelos (Von & Killingsworth, 1997).

Los análisis mediante el método de elementos finitos simulan problemas complejos de ingeniería y reducen los costos de pruebas experimentales. Además, el modelado permite un mejor control de los parámetros físicos del suelo y el ajuste de las variables de funcionamiento, así como la posibilidad de replicar pruebas en periodos cortos independientemente del tiempo (Hernández, y otros, 2019).

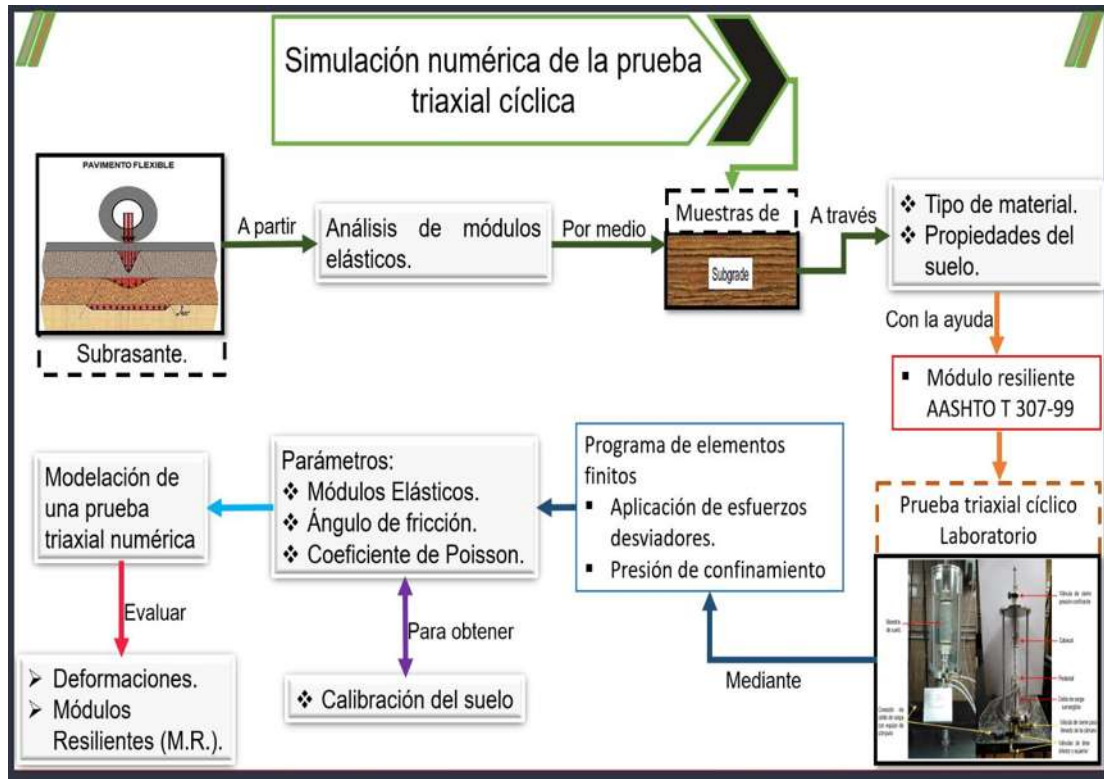


Figura 4.1: Metodología para la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica.

La metodología de trabajo que se seguirá para llevar a cabo la investigación está formada por 6 pasos, proporcionando los elementos y conceptos necesarios para desarrollar y ejecutar la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica, el cual se muestra en la figura 4.1.

Se plantea los siguientes pasos de la metodología para la solución de la problemática:

1. Selección de la muestra de suelo de la capa subrasante

- a. Selección del caso base.

A partir de la motivación de trabajar con la estructura del pavimento flexible, es importante analizar el rango de los valores del módulo resiliente de los diferentes tipos de suelos de grano fino como se observa en la tabla 4.1.

AASHTO, 2008				
SUELOS DE GRANO FINO				
Clasificación SUCS	MR (MPa)		kg/cm ²	
	CH	35	95	356.90
MH	55	120	560.85	1223.66
CL	95	165	968.73	1682.54
ML	105	175	1070.71	1784.51

Tabla 4.1: Valore típicos del módulo de resiliencia para suelos de grano fino

El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos orgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es LI=50%. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (baja compresibilidad) y si es mayor de 50 se añade la letra H (alta compresibilidad).

Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos (tabla 4.2):

ML	Limos Inorgánicos de baja compresibilidad.	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosa, o limos arcillosos con ligera plasticidad.
OL	Limos y arcillas orgánicas.	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de bajas plasticidad.
CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.
MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.
OH	Arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.

Tabla 4.2: Sistema unificado de clasificación de suelos de grano fino.

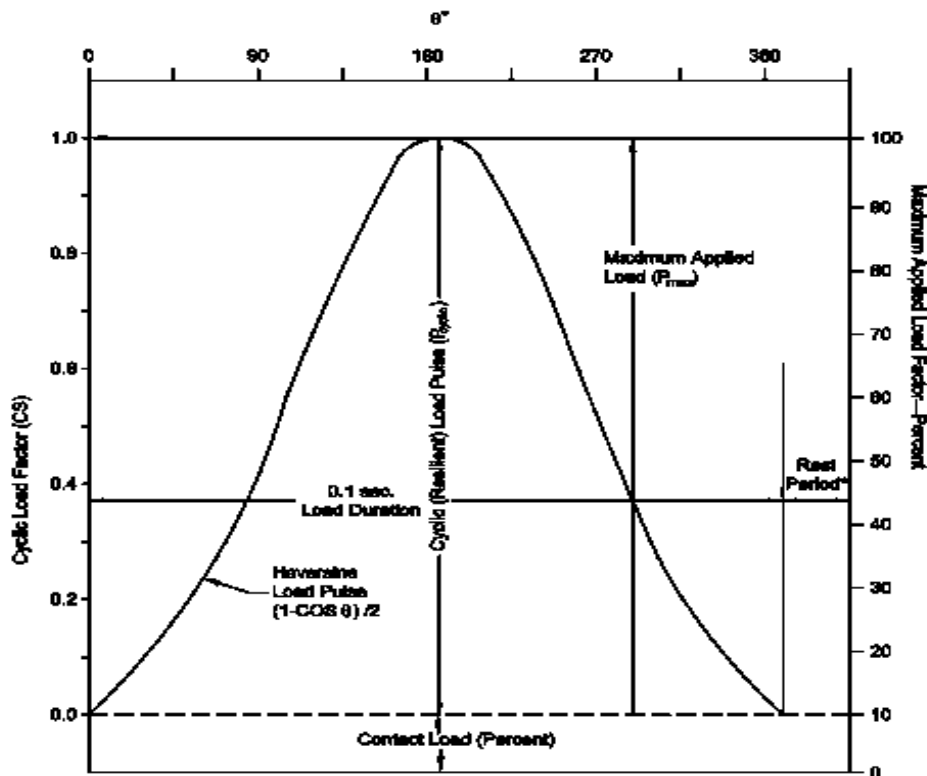
El sitio en donde se proyectaba construir el Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México (NAICM) se ubica en la zona de lago (zona III) la cual se distingue por tener una costra de desecación con espesores variables entre 0.4 a 2.0 metros. Por debajo de esta costra se encuentra la Formación Arcillosa Superior (FAS) con un espesor de hasta 15 metros de profundidad en promedio. La FAS está compuesta por estratos arcillosos lacustres muy blandos y compresibles, cuya clasificación predominante de acuerdo con el SUCS es CH (arcilla de alta plasticidad) (Romero, 2018).

De esta manera se obtiene la muestra de suelo para el caso de estudio de modelo numérico de una prueba triaxial cíclica, algunas de las propiedades que se presentan son los valores del límite líquido, límite plástico y la densidad de sólidos y contenido de humedad natural.

2. Caracterización, procedimiento e importancia de la prueba del Módulo Resiliente mediante la norma AASHTO T 307-99

El procedimiento de elaboración de la prueba del módulo de resiliencia se describe en la norma AASHTO T 307-99 para suelos finos y materiales granulares, los cuales son definidos como materiales tipo 1 y tipo 2 respectivamente. La ejecución de esta prueba se lleva a cabo en una cámara triaxial capaz de aplicar cargas cíclicas y consiste en aplicar a un espécimen de suelo formado en laboratorio o proveniente de un muestreo inalterado. Durante la prueba la respuesta total de la deformación axial residual es medida y utilizada en el cálculo del módulo de resiliencia.

El método se resume aplicando una secuencia de esfuerzos desviadores cíclicos de tipo haversiano (el tiempo de aplicación de carga de 0.1 s seguido por un tiempo de reposo de 0.9 s) a una frecuencia de 1 Hz, a una muestra de prueba cilíndrica como se puede observar en la figura 4.2. Durante la prueba, la muestra se somete a un esfuerzo cíclico dinámico y un esfuerzo de confinamiento estático proporcionado por medio de una cámara triaxial.



* The rest period will be 0.6 s for hydraulic loading devices and 0.9 to 3.0 s for pneumatic loading devices.

Figura 4.2: Definición de términos de módulos resilientes.

La secuencia de cargas aplicadas a la prueba triaxial según la norma AASHTO T 307-99 se muestra en la siguiente tabla 4.3

Secuencia de prueba para suelos de subrasante									
Secuencia No.	Presión de confinamiento, S_3		Esfuerzo axial máximo, S_{max}		Esfuerzo ciclico S_{cyclic}		Esfuerzo constante, $0.1 S_{max}$		No. De aplicación de carga
	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	kPa	psi	
0	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	500-1000
1	41.4	6	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
2	41.4	6	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
3	41.4	6	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
4	41.4	6	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
5	41.4	6	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
6	27.6	4	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
7	27.6	4	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
8	27.6	4	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
9	27.6	4	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
10	27.6	4	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100
11	13.8	2	13.8	2	12.4	1.8	1.4	0.2	100
12	13.8	2	27.6	4	24.8	3.6	2.8	0.4	100
13	13.8	2	41.4	6	37.3	5.4	4.1	0.6	100
14	13.8	2	55.2	8	49.7	7.2	5.5	0.8	100
15	13.8	2	68.9	10	62.0	9.0	6.9	1.0	100

Tabla 4.3: Secuencia de cargas aplicadas a la prueba triaxial de la norma AASHTO T 307-99

3. Programa de elementos finitos

Los análisis mediante el método de elementos finitos simulan complejos de ingeniería y reducen los costos de pruebas experimentales (Bravo et al., 2014). Además, el modelado permite un mejor control de los parámetros físicos del suelo y el ajuste de las variables de funcionamiento, así como la posibilidad de replicar pruebas en periodos cortos independientemente (Hernández, y otros, 2019).

Según Brinkgreve, (2004) describe que las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. El programa Plaxis utiliza una interface gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se trate.

La interface de usuario está constituida por cuatro módulos (Input (Entrada), Calculations (Cálculos), Output (Resultados) y Curves (Curvas)).

El módulo de introducción de datos (input): contiene todos los dispositivos necesarios para crear y modificar un modelo geométrico, así como para generar la correspondiente malla de elementos finitos y las condiciones de contorno.

El módulo de cálculos: contiene todos los dispositivos para definir e iniciar cálculos a realizar mediante el método de los elementos finitos. El programa de Cálculos se centra exclusivamente en los análisis de deformación y distingue entre un cálculo plástico (Plastic), un análisis de Consolidación (Consolidation), de Seguridad (Phi-c reduction) y un cálculo Dinámico (Dynamic).

El módulo de resultados (output): Dicho programa contiene todos los dispositivos para ver y elaborar listas de resultados correspondientes a la situación inicial y a cada fase de cálculo. El usuario debe empezar seleccionando el modelo y la fase de cálculo o el número de paso apropiados cuyos resultados se desea ver. Después de esta selección, se abre una primera ventana de resultados en la que se representa la malla deformada.

Los principales resultados que proporciona un cálculo mediante elementos finitos son los desplazamientos en los nodos y los esfuerzos en los puntos de tensión.

El programa de curvas: contiene todos los dispositivos para generar curvas de carga-desplazamiento, trayectorias de esfuerzo y diagramas esfuerzo-deformación.

En estas curvas se visualiza la evolución de ciertas variables de interés a lo largo del proceso de cálculo, lo que proporciona una mejor comprensión del comportamiento global y local del suelo. Los puntos para los que se desee generar las curvas deberán ser seleccionados haciendo uso de

la opción seleccionar puntos para curvas (Select points for curves) en el módulo de Cálculos (Calculations) antes de dar inicio al proceso del cálculo. No es posible generar curvas para puntos que no hayan sido previamente seleccionados, dado que la información requerida para ello no se encontrará en ningún fichero de datos para la generación de curvas.

El modelo de Hardening Soil calcula la dependencia del esfuerzo del suelo rigidez. Las deformaciones plásticas se calculan mediante la introducción de un criterio de rendimiento superficial y se supone que el endurecimiento es isotrópico, dependiendo del corte (de la cizalla) plástica y la deformación volumétrica. Los parámetros básicos para la rigidez del suelo, E , en el modelo de Hardening Soil son (ver figura 4.3):

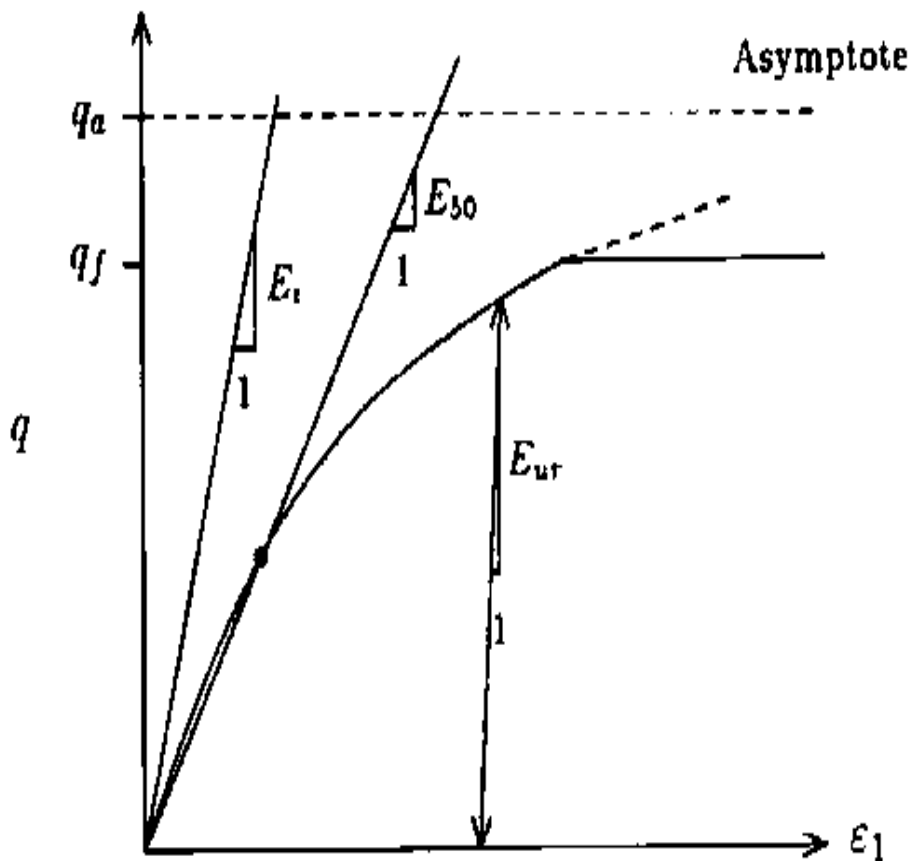


Figura 4.3: Relación esfuerzo-deformación hiperbólica en carga primaria para un drenaje estándar prueba triaxial (Schanz et al., 1999).

Donde m es el poder para la dependencia de la rigidez del nivel de esfuerzo; E_{50}^{ref} es la rigidez secante es una prueba triaxial con drenaje estándar: E_{oed}^{ref} es la rigidez de la tangente para la carga del edómetro primario; E_{ur}^{ref} es la rigidez de descarga / recarga ($E_{ur}^{ref} \cong 3E_{50}^{ref}$; c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción (Brinkgreve, 2007). El módulo triaxial, E_{50} , controla principalmente la superficie de fluencia por cortante y el módulo edométrico, E_{oed} , la superficie de fluencia de la capa. De hecho E_{50}^{ref} controla en gran medida la magnitud de las deformaciones plásticas relacionadas con la superficie de fluencia por cortante y E_{oed}^{ref} controla la magnitud de las deformaciones plásticas que se originan en el límite de rendimiento (Schanz et al., 1999).

La carga axial a la cual se somete la probeta es llamada Esfuerzo Desviador (σ_d) y debe ser aplicada perpendicularmente por medio de un pistón hasta que disminuya con respecto a la deformación del espécimen, o sea, hasta que falle. Por otro lado, si la falla es provocada por el aumento de la presión lateral, se considera entonces que se produjo un ensayo de extensión triaxial (Dotti, 2008).

Las presiones de confinamiento se llaman σ_2 y σ_3 . Ambas son iguales en magnitud, ya que es el esfuerzo aplicado por la presión en la cámara al inicio y en dirección corresponden a los ejes X, Y de un campo tridimensional, como se muestra en la figura 4.4. Así se puede asumir que: $\sigma_2 = \sigma_3$.

El esfuerzo normal al cilindro se llama σ_1 y corresponde solamente a la dirección Z. Debido a que los esfuerzos σ_2 y σ_3 son uniformes alrededor de todo el espécimen, σ_1 se define como la suma σ_3 y el esfuerzo desviador (σ_d) aplicado durante la segunda parte de la prueba: $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_d$.

El esfuerzo desviador es el resultado de dividir la carga aplicada entre el área de aplicación σ_d , en otras palabras, el área de la sección transversal del cilindro.

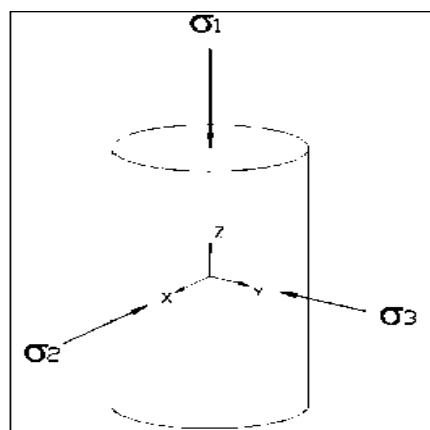


Figura 4.4: Representación de esfuerzos para un ensayo triaxial.

4. Calibración del suelo

La ingeniería inversa es una metodología que se aplica o se utiliza para obtener un modelo a partir de un objeto de referencia. A menudo, los datos que necesitamos están disponibles en imágenes, gráficos, diagramas y otros formatos publicados. Extraer estos datos de estos medios publicados es una tarea muy desafiante y que requiere mucho tiempo.

WebPlotDigitizer (2017) es una herramienta semiautomatizada la que funciona con una amplia variedad de gráficos, así como también los algoritmos de extracción automática. Obteniendo de esa manera los datos de la gráfica para el análisis de la calibración del suelo y de esa manera realizar simulaciones.

Conforme a lo descrito por Kelton, Sadowski & Sturrock (2008), dice que la “La simulación es el proceso de diseñar y crear un modelo computarizado de un sistema real o propuesto con la finalidad de llevar a cabo experimentos numéricos que den un mejor entendimiento del comportamiento de dichos sistemas en un conjunto dado de condiciones”.

Para determinar la correlación entre la simulación experimental y la simulación de laboratorio se llevó a cabo mediante el coeficiente de correlación de Pearson en la que nos informa del grado de relación entre dos variables. Si la relación es lineal perfecta, r será 1 ó -1. El coeficiente r será positivo si la relación es positiva (al aumentar x aumenta y), y r será negativo en el caso contrario (si al aumentar x , disminuye y).

Otra opción que se utiliza es el coeficiente de determinación, denominado R cuadrado y sirve para reflejar la bondad del ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar. Pueden adquirir resultados que oscilan entre 0 y 1. Así, cuando adquiere resultados más cercanos a 1, mayor resultará el ajuste del modelo a la variable que se pretende aplicar para el caso en concreto. Por el contrario, cuando adquiere resultados que se acercan al valor 0, menor será el ajuste del modelo a la variable que se pretende aplicar y, justo por eso, resultará dicho modelo menos fiable.

Por lo tanto, se realizan varias simulaciones para encontrar una calibración del suelo aproximado, en la que depende de la aplicación de esfuerzos desviadores, presión de confinamiento y del análisis de los parámetros de resistencia, y rigidez.

5. Simulación de la prueba triaxial numérica

En este estudio se desarrolla la implementación del método de los elementos finitos que permite modelar la etapa de falla del ensayo de compresión triaxial drenado. Para desarrollar el modelo es necesario conocer sus principales conceptos para comprender y analizar cada una de sus partes que lo constituyen, su configuración y cada uno de los parámetros del cual está conformado el modelo constitutivo.

La simulación se desarrolla a partir del método de los elementos finitos que permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) -sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema- dividiéndole en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados <<elementos finitos>>.

Para configurar la simulación se realiza mediante un ensayo triaxial el cual constituye el método más versátil en el estudio de las propiedades esfuerzo-deformación y la principal acción es obtener parámetros del suelo. En un ensayo triaxial se colocan cargas de confinamiento (σ_3) y cargas axiales (σ_1) tratando de simular las condiciones reales de esfuerzos en el suelo. El comportamiento esfuerzo-deformación es determinado por la presión de confinamiento, la historia de esfuerzos y otros factores.

Existen diferentes tipos de ensayo triaxial entre ellos el no consolidado no drenado (UU) que busca determinar la respuesta ante un proceso de carga rápida, en este ensayo no se permite desarrollar consolidación y se encuentra una respuesta constante de resistencia al corte no drenado.

Otros tipos de ensayos que permiten la estimación de los parámetros de resistencia a largo plazo, es decir, en términos de esfuerzos efectivos, son los ensayos consolidados no drenado (CU) y consolidado drenado (CD). En el ensayo consolidado no drenado (CU) se permite la consolidación inicial de la muestra y seguido a ello se lleva a la falla sin dejar que se disipen los excesos de presión de poros; estos últimos se producen por los procesos de dilatancia o tendencia al cambio de volumen de la muestra ante esfuerzo de corte.

Por su parte, en el ensayo consolidado drenado (CD) se permite tanto en la consolidación inicial de la muestra como el drenaje en la etapa de falla, esto se logra al aplicar desplazamiento de manera lenta si se trata de un ensayo a deformación controlada. Por lo tanto, este es el ensayo que se utilizó en esta simulación ya que se seleccionó este tipo de análisis por ser el más simple para la simulación numérica.

Las condiciones de contorno del problema consisten en la configuración axisimétrico propio de la geometría del ensayo triaxial y su consiguiente representación bidimensional en donde se analiza solo una sección de la geometría. A partir de este análisis se busca la reproducción de las curvas esfuerzo-deformación.

Según las características del comportamiento esfuerzo-deformación se pueden extender como endurecimiento por deformación donde hay un aumento en la resistencia del material debido a las deformaciones producidas.

6. Evaluar deformaciones y módulos resilientes

Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantáneas y suelen denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la causa deformadora (SCT., 2001). Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando; debe hacerse notar el hecho de que en ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda la deformación recuperable, en este momento se tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo de resiliencia, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.

Así entonces, el concepto de módulo de resiliencia está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida. El módulo de resiliencia se define como la relación de esfuerzos cíclicos aplicados sobre la deformación recuperable de la muestra luego de muchos ciclos de cargas repetidas y por lo tanto es una medida directa de la rigidez de los materiales no consolidados en los sistemas de pavimentos (Menéndez, 2016a).

El mecanismo de acumulación de la deformación permanente se muestra en la figura 4.5 se debe notar que en los ciclos intermedios la deformación permanente disminuye para cada ciclo, hasta prácticamente desaparecer (Moreno, 2016).

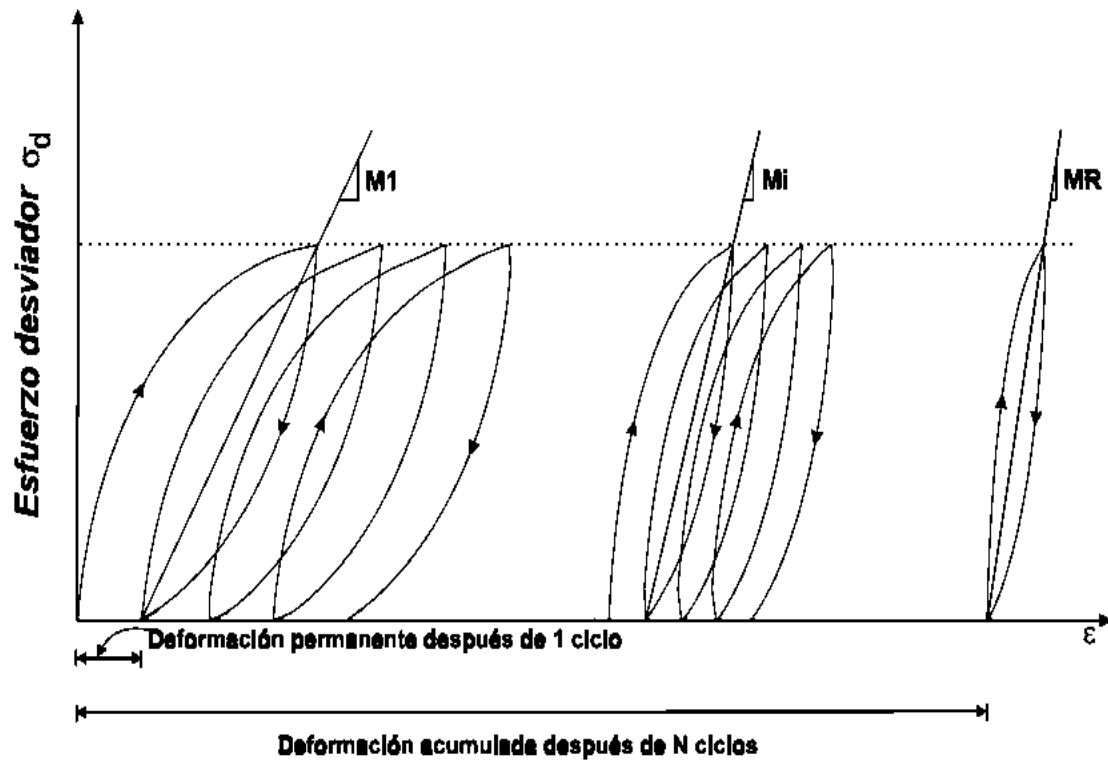


Figura 4.5: Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador (SCT., 2001).

En el siguiente capítulo se desarrolló paso a paso el procedimiento de la metodología de la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica.

Capítulo 5

Implementación de la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica

En este capítulo se desarrolla la implementación de la simulación numérica de una prueba triaxial cíclica. Se describe paso a paso la metodología del método en el programa de elementos finitos Plaxis por medio del modelo constitutivo de Hardening Soil. Uno de los principales elementos es la calibración del suelo en la cual se obtiene los parámetros de la muestra numérica a través de la curva de esfuerzo – deformación de la muestra del suelo experimental.

En la simulación numérica de la prueba triaxial se desarrolla a partir de 15 secuencias para evaluar el comportamiento resiliente de las arcillas del ex Lago de Texcoco.

1. Selección de la muestra de suelo de la capa subrasante

a. Selección del caso base

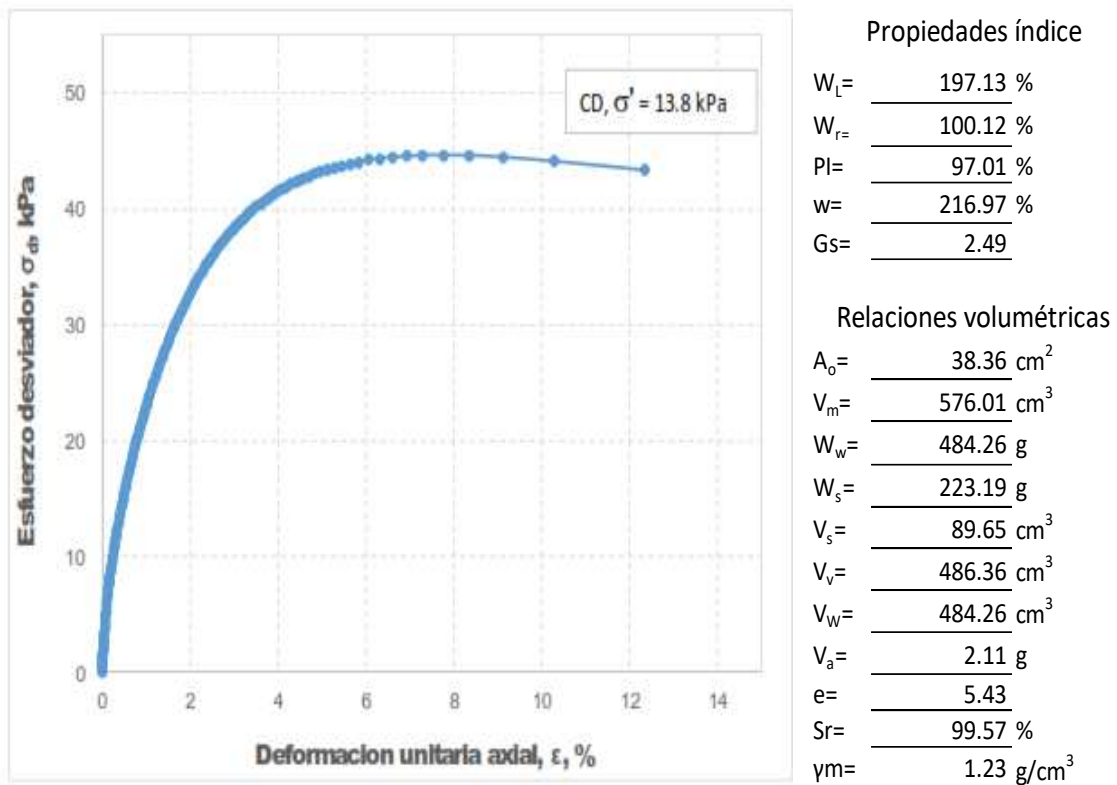
El caso base de estudio se ha recopilado de la tesis de Lerma (2017) obteniendo de ello las propiedades índices, relaciones volumétricas, densidad de sólidos y módulo resiliente de la muestra de suelo extraída a profundidades entre 0.50 a 2.0 m, obtenida mediante tubos tipo Shelby de 10 cm de diámetro y 50 cm de longitud, en la Zona Federal del ex lago de Texcoco (ver tabla 5.1).

PCA	Muestra	Profundidad		Límite líquido, LL (%)	Límite plástico, PL (%)	Índice de plasticidad, PI	Densidad de sólidos, G_s	Contenido de agua w (%)
		Inicial (m)	Final (m)					
61	2	0.50	1.00	164.67	58.83	97.01	2.49	164.96

Tabla 5.1: Propiedad índice de muestra (Lerma 2017).

Del ensayo de módulo de resiliencia en el laboratorio para especímenes de suelos arcillosos recuperados de la zona del ex lago de Texcoco conforme los procedimientos descritos en la Norma AASHTO 307-99, se ha tomado como base una muestra de suelo para iniciar con la calibración numérica mediante un modelo de elementos finitos.

En la siguiente gráfica (ver gráfica 5.1) se muestran los datos para la calibración del tipo suelo:



Gráfica 5.1: Módulo de resiliencia del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Lerma 2017).

La norma estándar AASHTO T 307-99 es utilizada para determinar el módulo de resiliencia en suelos y agregados pétreos, establece que el diámetro del espécimen de prueba debe ser de 71 mm o de 86 mm de diámetro, en la siguiente figura (ver figura 5.1) se muestra el aspecto de la probeta de la cámara triaxial después del montaje.



Figura 5.1: Montaje de probeta de suelo en cámara triaxial (Lerma 2017).

2. Caracterización, procedimiento e importancia de la prueba del Módulo Resiliente mediante la norma AASHTO T 307-99

El método se resume aplicando una secuencia de cargas aplicadas a la prueba triaxial según la norma AASHTO T 307-99 a una muestra de prueba cilíndrica. Sin embargo, debido a que los niveles de esfuerzos desviadores cíclicos definidos por la norma AASHTO T-307-99 (ver la Tabla 5.2) para la determinación del módulo resiliente en suelos arcillosos altamente compresibles, resultan cercanos y en algunos casos alcanzan a los esfuerzos en los cuales las arcillas del sitio de estudio presentan la condición de falla tal como se indica en la Tabla 5.2 se diseñó una secuencia de esfuerzos que permitiera evaluar el comportamiento resiliente de las arcillas del Ex-Lago de Texcoco de manera adecuada (Lerma 2017).

Se realiza determinaciones de los módulos resilientes en condiciones consolidadas drenadas (CD) a fin de conocer la deformabilidad del suelo bajo mayores niveles de esfuerzo. En la tabla se muestra las presiones de confinamiento son 41.4, 27.6 y 13.8 kPa, con esfuerzos desviadores de 2.549, 5.098, 7.647, 10.196 y 12.745, en cada número de secuencia existe un número de aplicación de carga de 100 ciclos, por lo tanto, cada una de estas se utiliza para el diseño de la simulación.

No. de Secuencia	Presión de confinamiento,	Esfuerzo Axial Max.,	Esfuerzo Cíclico,	Esfuerzo de Contacto, 0.1	No. de aplicación de carga
	σ_3 / σ'	σ_{max}	$\sigma_{ciclico}$	σ_{max}	
	kPa	kPa	kPa	kPa	
0	41.4	5.098	4.588	0.510	500-1000
1	41.4	2.549	2.294	0.255	100
2	41.4	5.098	4.588	0.510	100
3	41.4	7.647	6.883	0.765	100
4	41.4	10.196	9.177	1.020	100
5	41.4	12.745	11.471	1.275	100
6	27.6	2.549	2.294	0.255	100
7	27.6	5.098	4.588	0.510	100
8	27.6	7.647	6.883	0.765	100
9	27.6	10.196	9.177	1.020	100
10	27.6	12.745	11.471	1.275	100
11	13.8	2.549	2.294	0.255	100
12	13.8	5.098	4.588	0.510	100
13	13.8	7.647	6.883	0.765	100
14	13.8	10.196	9.177	1.020	100
15	13.8	12.745	11.471	1.275	100

Tabla 5.2: Secuencia de prueba para arcillas del ex Lago de Texcoco (Lerma, 2017).

3. Programa de elementos finitos

A continuación, se desarrolla la metodología para llevar la simulación numérica de una prueba triaxial cíclica en el software de elementos finitos Plaxis en la cual se empieza por utilizar el caso de estudio para desarrollar el modelo constitutivo de Hardening Soil.

- I. El procedimiento para desarrollar el proyecto en el programa Plaxis es la configuración general (General Settings), donde se encuentra los ítems de proyecto y dimensiones. En el primero, se coloca el título del proyecto, el modelo asimétrico y en el submenú elementos, 15 nodos; en el segundo, se colocan las unidades de longitud, fuerza y tiempo en m, KN y día respectivamente; en este segundo ítem (dimensiones) también se colocan las dimensiones geométricas que representan las dimensiones del área en que se desea trabajar.
- II. Luego se configura el tipo de material con los parámetros del suelo del modelo Hardening Soil los cuales son: el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}), módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}), dependencia al estado de esfuerzo (m), cohesión (c), ángulo de fricción (Φ), ángulo de dilatación (ψ), relación de Poisson en descarga-recarga (ν_{ur}), esfuerzo de referencia (p_{ref}), coeficiente de presión lateral de tierras (k_0 nc)

y relación de falla (Rf) y se selecciona el tipo de drenaje que es drenado (Drained) que indica el comportamiento del material.

- III. El siguiente paso es realizar la geometría del proyecto, en la cual, el espécimen es de 1 m por un 1 m, colocándole cada una de los elementos finitos bidimensionales como son: la presión de confinamiento (esfuerzo principal menor σ_3), esfuerzo axial Máximo (esfuerzo principal mayor σ_1) y el esfuerzo cíclico ($\sigma_{cíclica}$). La geometría simplificada en el modelo triaxial representa una cuarta parte de la muestra de suelo. Las deformaciones a lo largo de los límites (línea AC Y CD) se mantienen libres para permitir un movimiento suave a lo largo de los ejes de simetría, mientras que las deformaciones perpendiculares a los límites se fijan. De una forma similar a la condición de contorno de la prueba triaxial, así los límites AB y BD se puede mover libremente. El esfuerzo desviador aplicado y el esfuerzo de confinamiento, se simulan con un sistema de carga distribuida para AB y BD, como se indica en la figura 5.2.

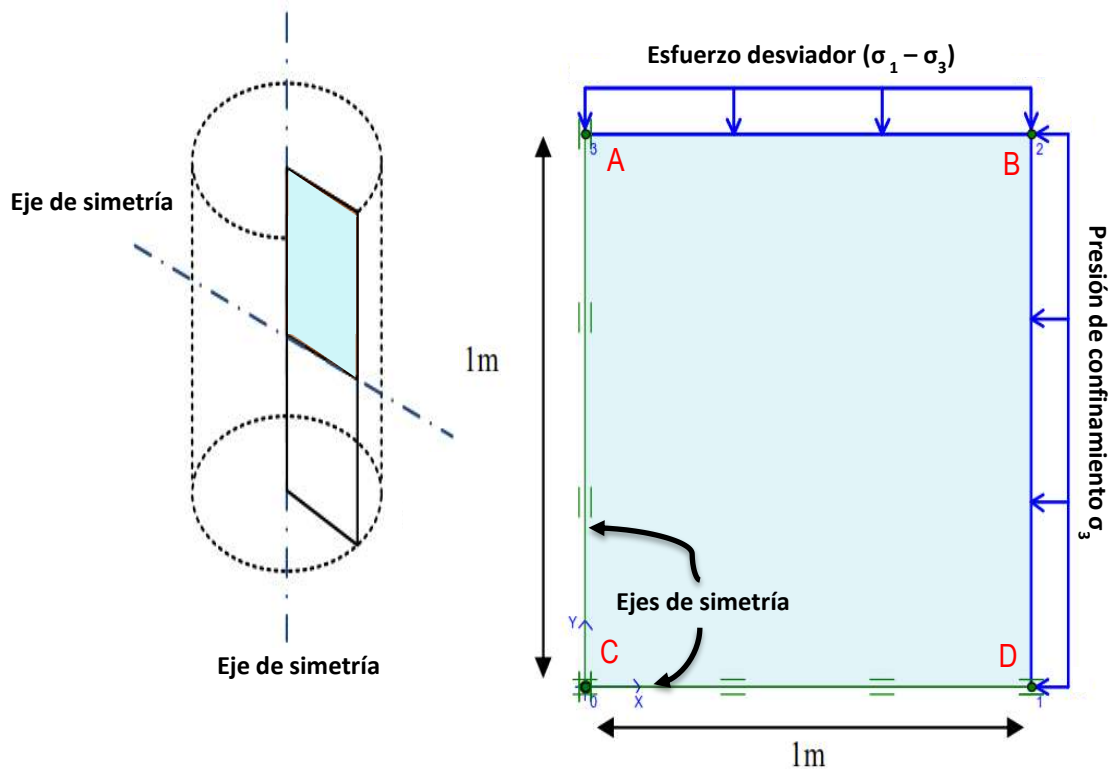


Figura 5.2: Geometría simplificada de la prueba triaxial en modelos de elementos finitos (Elaboración propia).

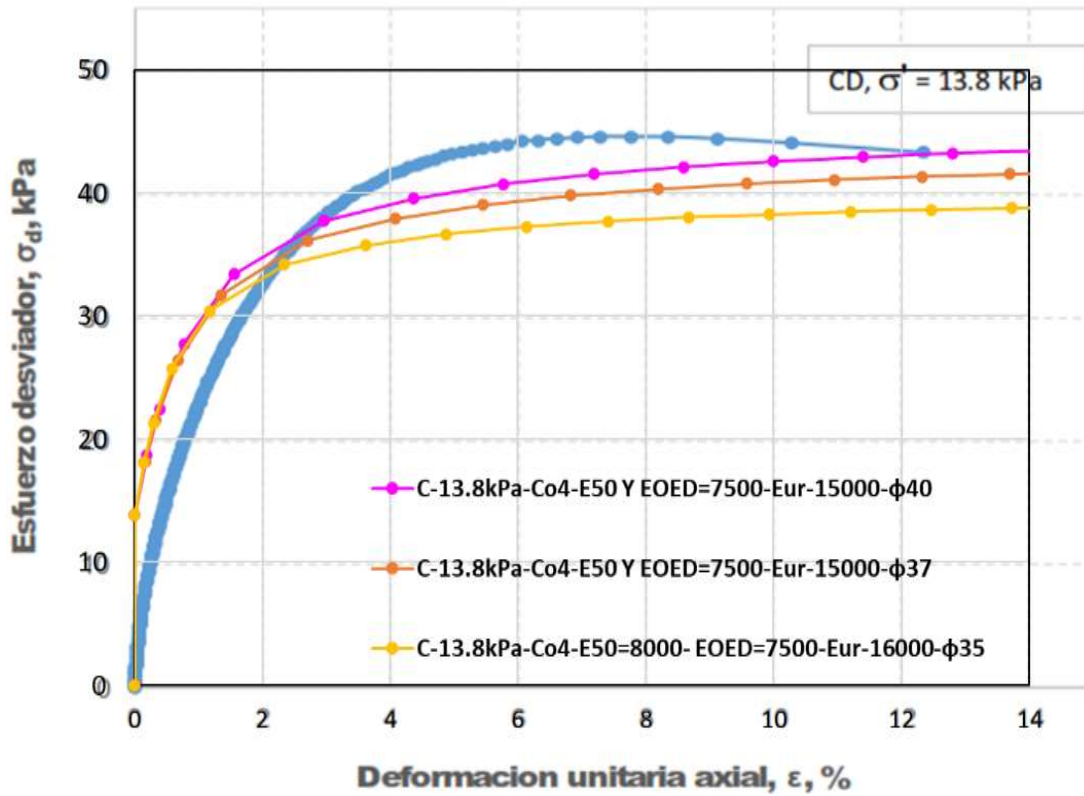
- IV. Una vez que termina el paso anterior, se procede a realizar los pasos necesarios para el correcto funcionamiento del programa como generar la malla (Generate mesh), las etapas de construcción y como último paso el cálculo de las etapas de construcción.

4. Calibración de suelos

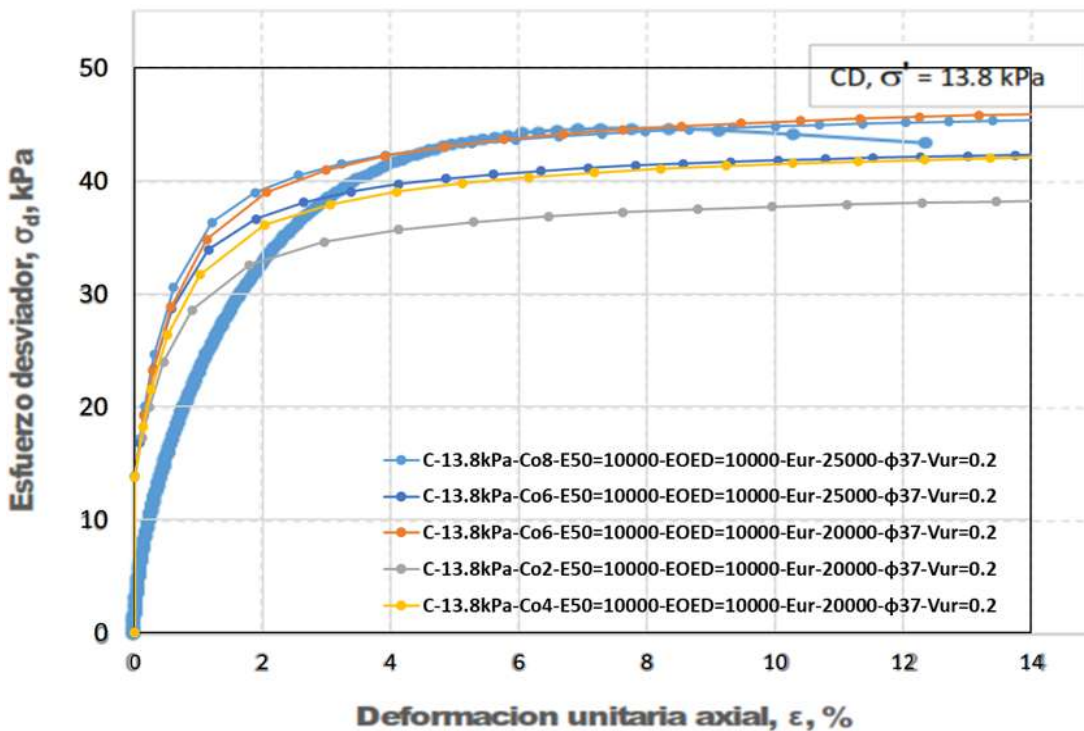
Para encontrar el tipo de suelo aproximado del caso de estudio que se presenta en la tabla 5.1, se continua con la calibración de suelos que se realiza mediante la siguiente metodología que parte del último paso de la configuración del desarrollo del modelo constitutivo Hardening Soil.

- 1) En las etapas de construcción se configura la etapa 1 como la fase inicial representa el montaje del espécimen y el ensaye para determinar el módulo resiliente (MR) en condiciones consolidada drenada (CD).
- 2) La etapa 2 representa la etapa de consolidación del espécimen en la que el tipo de cálculo es plástico (Plastic), en la que se utiliza una presión de confinamiento y esfuerzo desviador de 13.8 kPa, en la cual se simula el proceso de precarga al que será sometido el suelo.
- 3) La etapa 3 representa la primera descarga en la que se determina el MR, a la probeta de suelo se le aplica una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador de 13.8 kPa.
- 4) Al final se obtiene la deformación unitaria axial (ϵ %) contra el esfuerzo desviador (σ_d , kPa). Es la principal información que se utiliza para realizar la aproximación de la calibración del suelo experimental.

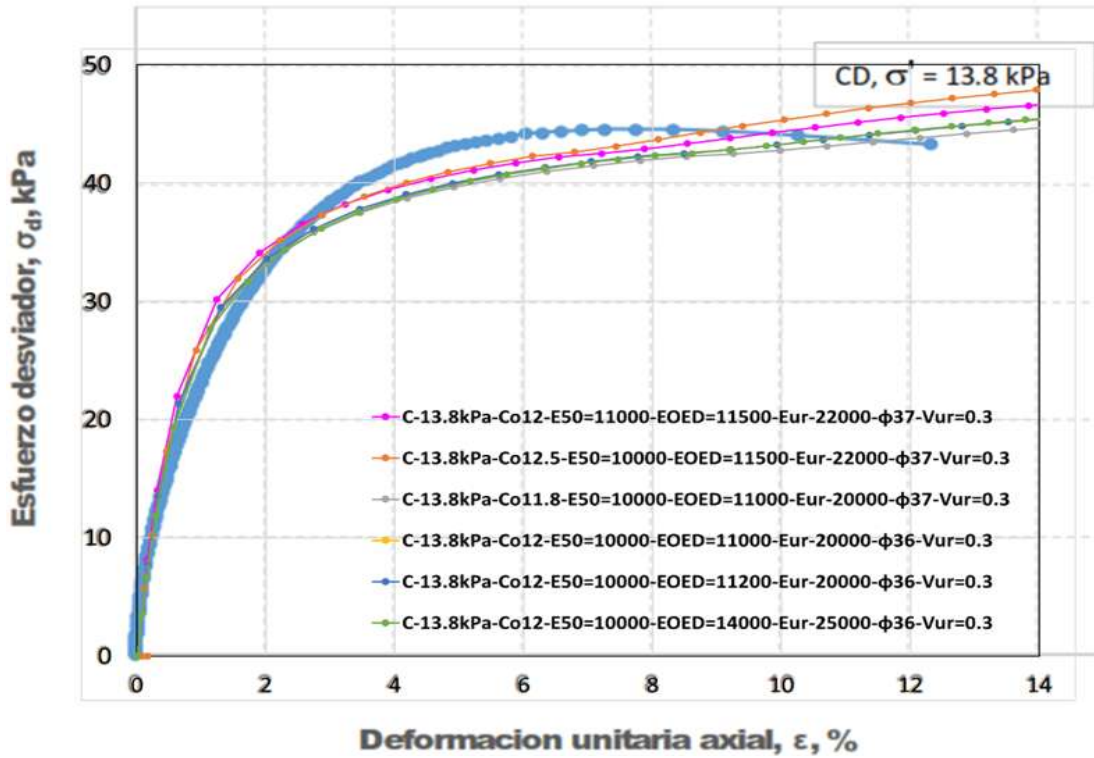
El primer acercamiento de los parámetros de la muestra de suelo numérico se puede observar en las siguientes gráficas que va del 5.2 a la 5.6.



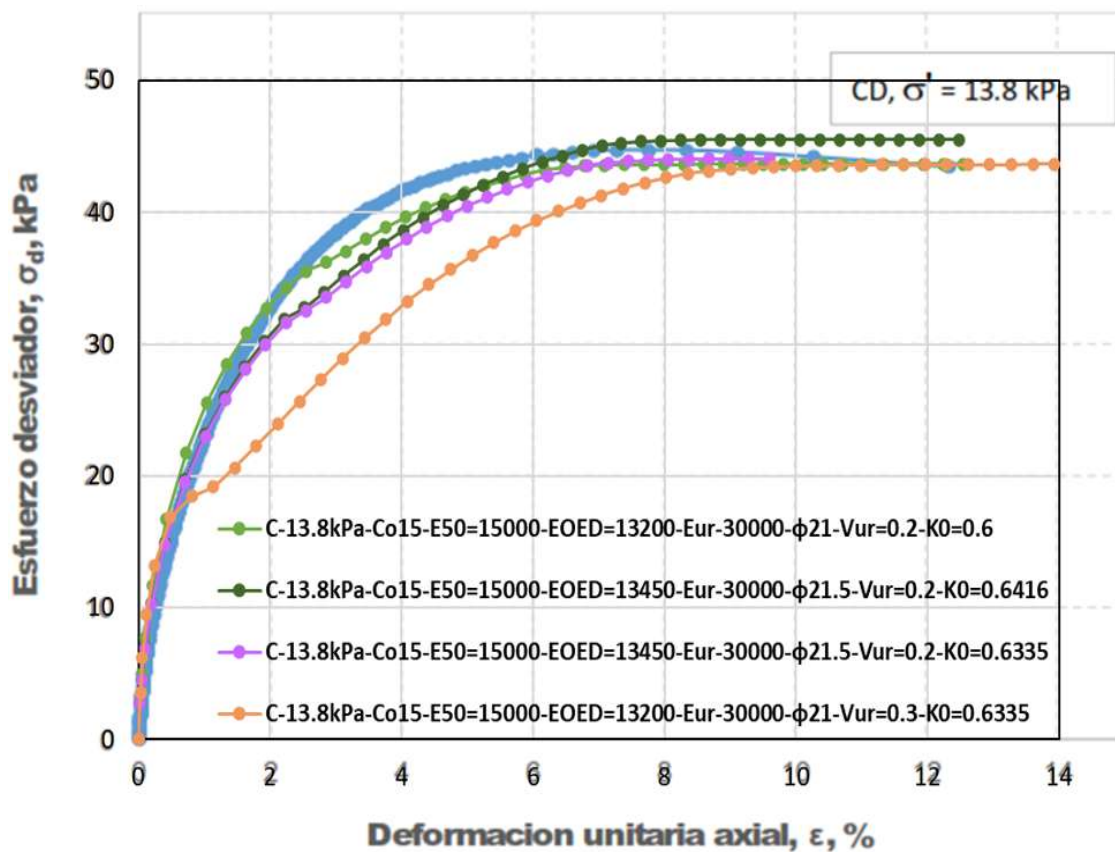
Gráfica 5.2: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).



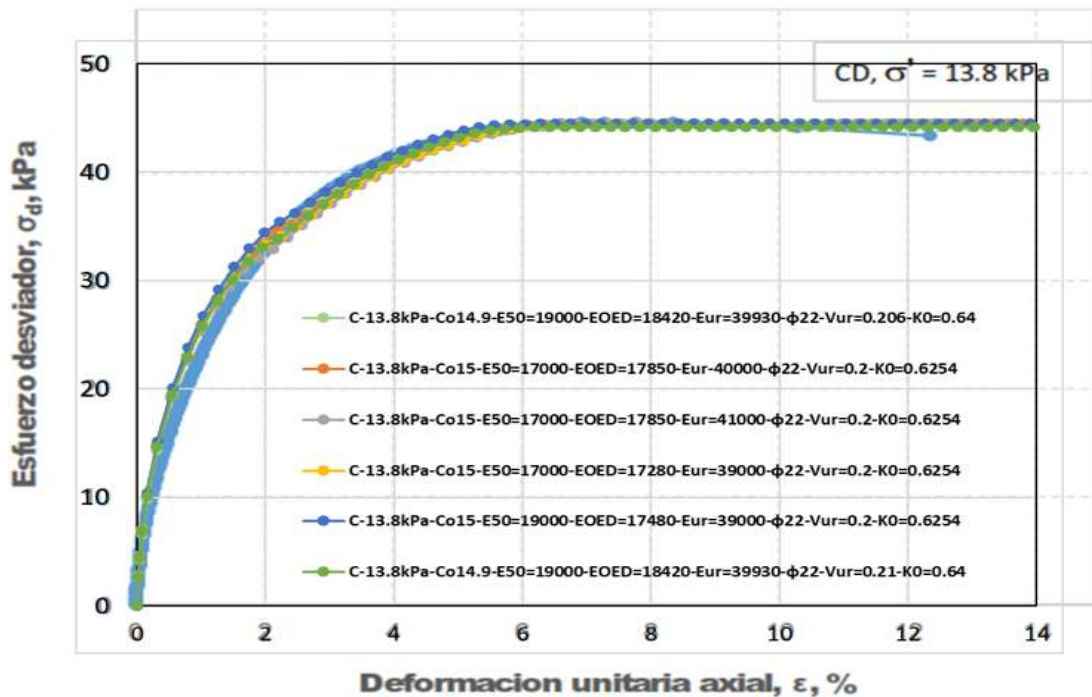
Gráfica 5.3: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).



Gráfica 5.4: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).



Gráfica 5.5: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).



Gráfica 5.6: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. (Elaboración propia).

- 5) De la misma manera se realizaron alrededor de 50 calibraciones para encontrar la calibración aproximada de los valores de cada uno de los parámetros del método constitutivo Hardening Soil. En donde al empezar los cambios se dieron con la cohesión (C_0) y el coeficiente de fricción (ϕ) pero como se observa en la gráfica no se aproximaba a la curva experimental que se muestra en la gráfica. Por lo tanto, se realizó pequeños cambios en los parámetros para llegar al objetivo principal.

5. Simulación numérica de la prueba triaxial

Para llevar a cabo el desarrollo de la simulación se da a partir de la calibración del suelo en donde se obtiene cada uno de los parámetros del modelo constitutivo Hardening Soil, ya que se tiene esa parte se inicia la configuración de las 15 secuencias de la prueba para arcillas del ex Lago de Texcoco.

El esquema general para determinar el Módulo Resiliente (MR) es el siguiente:

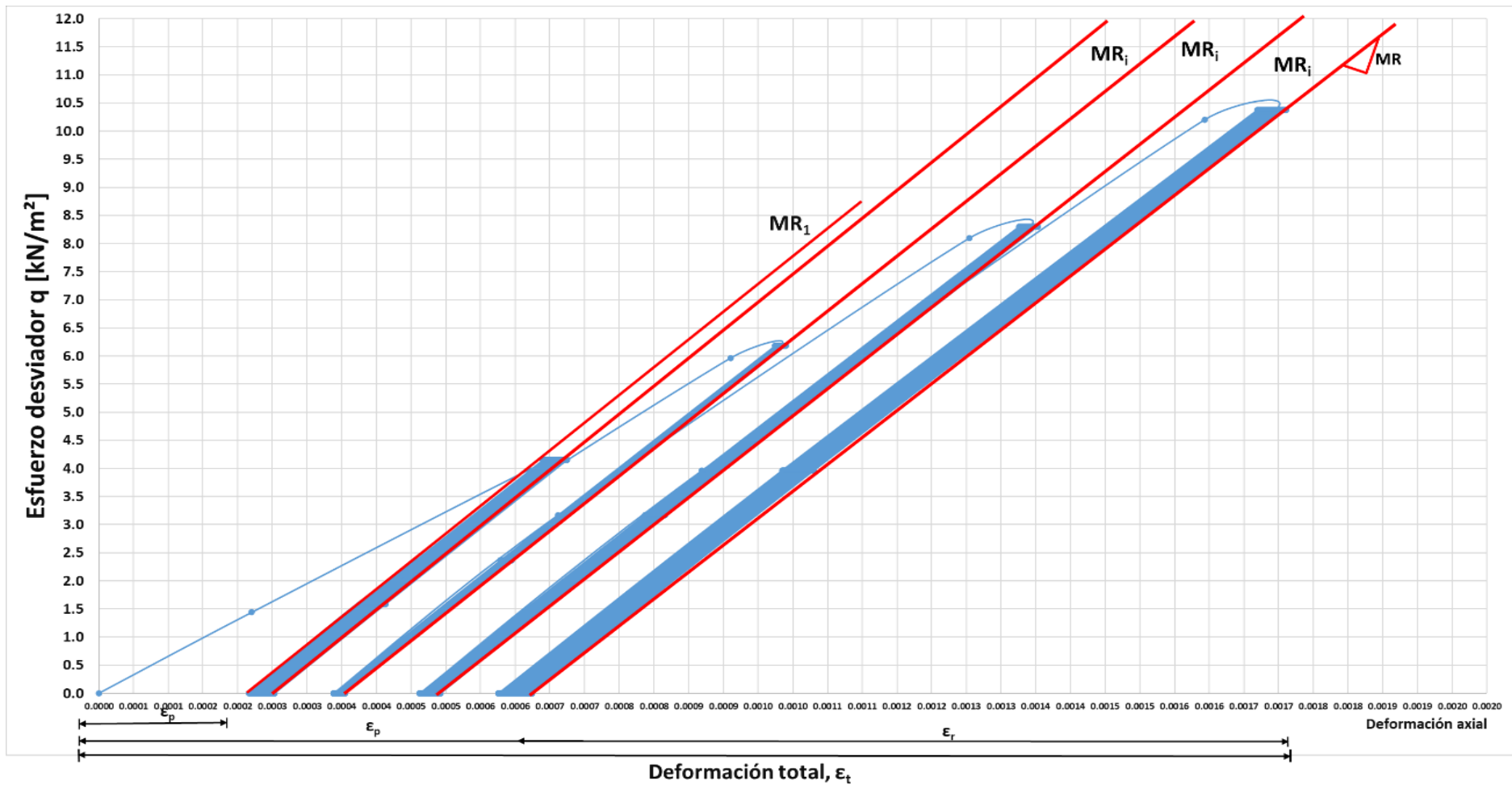
- I. Fase inicial: es el montaje del espécimen, aquí se presenta las condiciones iniciales (se activa la casilla Ignore Suction), en la situación inicial no se presenta el tipo de suelo.

- II. Consolidación: en esta fase el tipo de cálculo es plástico (Plastic), en la pestaña General se habilitan las siguientes casillas: ignorando el comportamiento (Ignore undre. Behaviour), restablecer el desplazamiento desde cero (Reset displacements to zero) e ignorar la succión (Ignore suction). La presión de confinamiento que se le aplica es de 41.4 kPa y con un esfuerzo desviador de 41.4 kPa.
- III. La secuencia 0 se desarrolla en 4 fases de 100 ciclos, acumulando la cantidad de 400 ciclos. En la primera fase en la secuencia 0 con 100 ciclos, en la pestaña general en el tipo de cálculo es dinámico, en el intervalo de tiempo dinámico se coloca la cantidad de 100 segundos, en la pestaña de parámetros de control de deformaciones se activa la casilla restablecer los desplazamientos a cero (Reset displacements to zero) y el de ignorar la succión.

Para definir los multiplicadores dinámicos en la ventana multipliers muestra Load multipliers se carga el archivo con extensión .smc que contiene los primeros 100 pulsos haversiano. Se aplica una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador de 41.4 kPa y un esfuerzo cíclico de 4.588 kPa, de esta misma manera se realizaron las 4 fases para completar los 400 ciclos uno de los cambios que se realiza es en el intervalo de tiempo dinámico en la que queda, 200, 300, 400 segundos.

- IV. A partir de la secuencia 1 hasta la secuencia 5 se aplica una presión de confinamiento y un esfuerzo desviador de 41.4 kPa, con diferentes esfuerzos cíclicos que son 2.294, 4.588, 6.883, 9.177 y 11.471 kPa, cada una de estas secuencias con la aplicación de carga de 100 ciclos, en donde va de 500 a 900 segundos en el intervalo de tiempo dinámico, activando la casilla de ignorar la succión (Ignore suction).
- V. En las siguientes secuencias que es de la 6 hasta 10 el procedimiento es similar al paso anterior con la diferencia de que la presión de confinamiento y el esfuerzo desviador que se aplica es de 27.6 kPa, en estas secuencias se realiza la primera descarga en la probeta. En el intervalo de tiempo dinámico varía de 1,000 a 1,400 segundos.

- VI. Las últimas secuencias que son 11 hasta el 15 se representa la segunda descarga en la que se le aplica una presión de confinamiento y el esfuerzo desviador de 13.8 kPa, con el mismo esfuerzo cíclico y aplicación de carga que los pasos anteriores. Desde la secuencia 0 hasta la número 15 se obtiene el módulo de resiliencia de cada una de estas, con un intervalo de tiempo dinámico de 1,500 a 1,900 segundos.
- VII. Al final de la configuración de las secuencias se selecciona los puntos para las curvas que son los puntos de esfuerzos, después de ello se calcula el modelo numérico de la prueba triaxial cíclico la cual tarda alrededor de 12 horas.
- VIII. Al final se producen los resultados del cálculo, para generar y obtener curvas que parte del esfuerzo desviador contra deformación, mediante estas curvas se obtiene datos para obtener el Módulo Resiliente por cada ciclo de cada secuencia como se muestra en la siguiente gráfica 5.7.



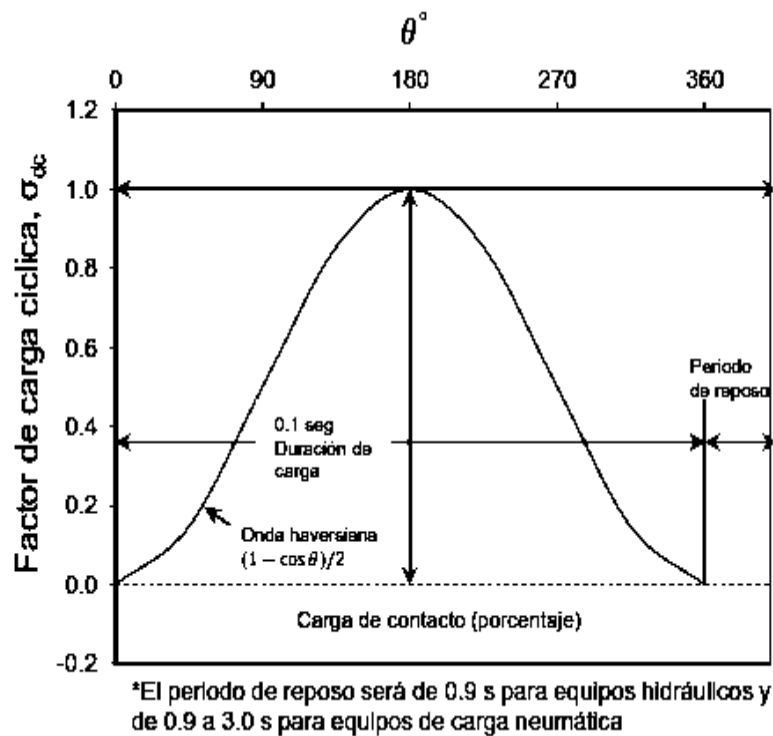
Gráfica 5.7: Deformación acumulada con el número de aplicaciones del esfuerzo desviador (Elaboración propio).

Capítulo 6

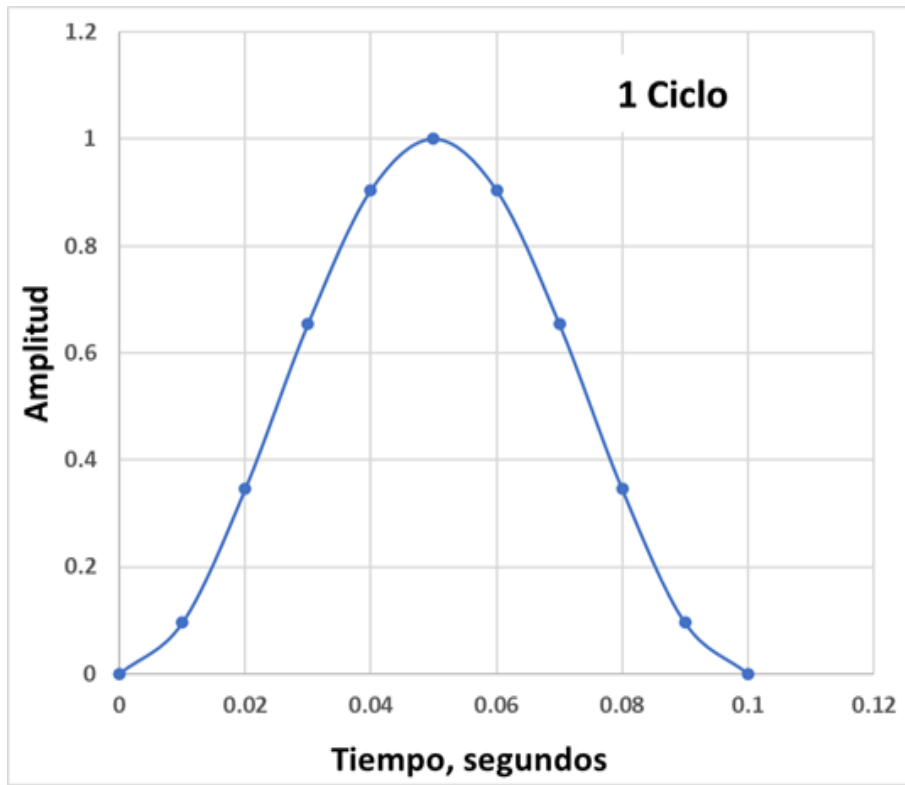
Resultados

Los resultados que se obtuvieron se dividen en dos partes, en la primera parte se obtiene la calibración del suelo que se ajusta a la curva esfuerzo – deformación del caso de estudio, en la cual se conoce los parámetros de rigideces por medio del modelo constitutivo Hardening Soil. En la segunda parte se muestra los resultados del módulo resiliente de la muestra de suelo mediante la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica. A continuación, se presenta los resultados obtenidos.

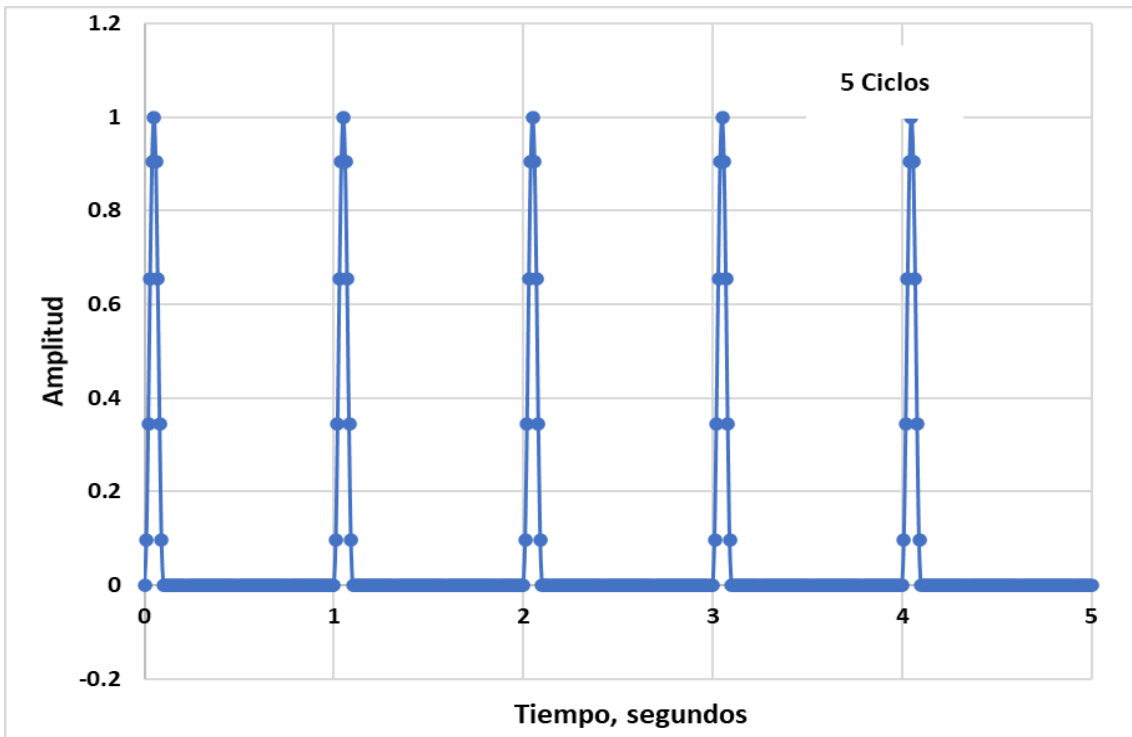
La norma utiliza una secuencia de esfuerzos desviadores cíclicos de tipo Haversiano (tiempo de aplicación de carga de 0.1s seguido por un tiempo de reposo de 0.9 s) a una frecuencia de 1 Hz. La cual se configuro para obtener los 100 ciclos utilizando los 360°, en una duración de carga de 0.1 segundo, con un paso de tiempo de 0.005 segundos, con un paso de 18° en donde se obtiene 20 puntos en pulso, como se puede mostrar en las siguientes gráficas (ver gráfica 6.1 al 6.3).



Gráfica 6.1: Patrón de carga haversiano (AASHTO-T 307-99, 2012).

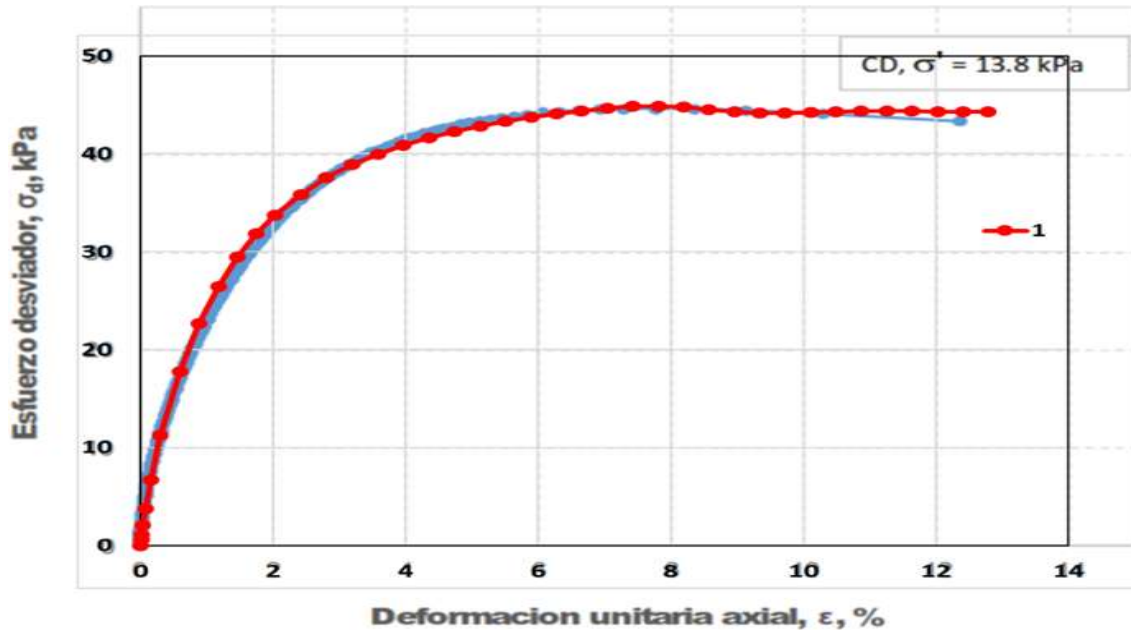


Gráfica 6.2: Patrón de carga haversiano (Elaboración propia).



Gráfica 6.3: Ejemplo del pulso haversiano (elaboración propia).

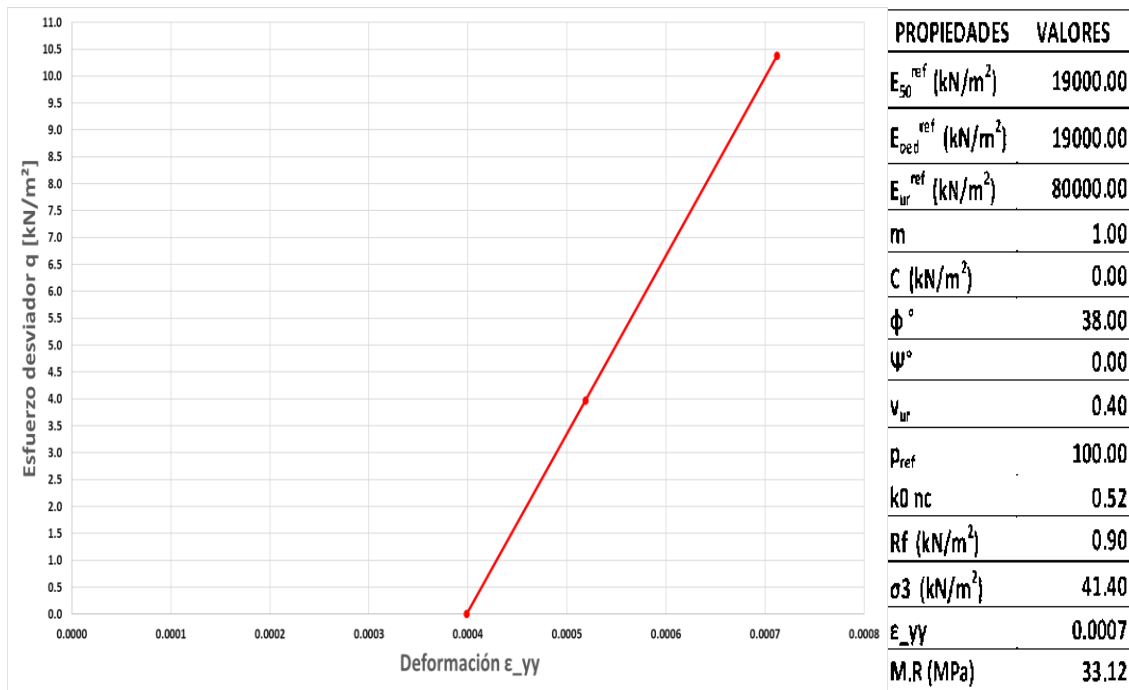
Para la calibración del suelo después de un número alrededor de 80 simulaciones, se realizó una selección de 6 tipos de suelo, en la que se toma en consideración el cálculo de ajuste de la curva que permite la modificación de los parámetros, para evaluar de manera numérica la descripción que se tiene del suelo. Enseguida se muestran las gráficas de las calibraciones aproximadas a la muestra del suelo experimental, el primer acercamiento dio un MR de 33.12 MPa (ver gráfica 6.4 a la 6.6), pero al dato que se tenía que llegar es a 9.0 MPa, por lo tanto, se volvió a seleccionar otra opción.



Gráfica 6.4: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Primera opción (Elaboración propia).

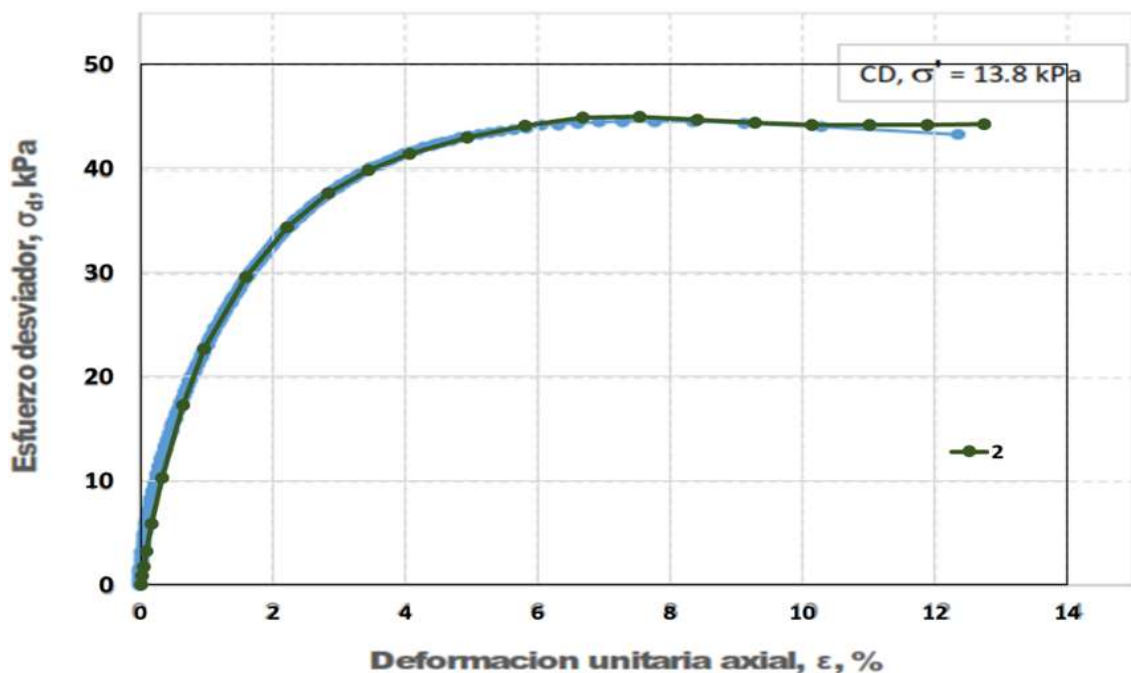


Gráfica 6.5: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=33.12 MPa.

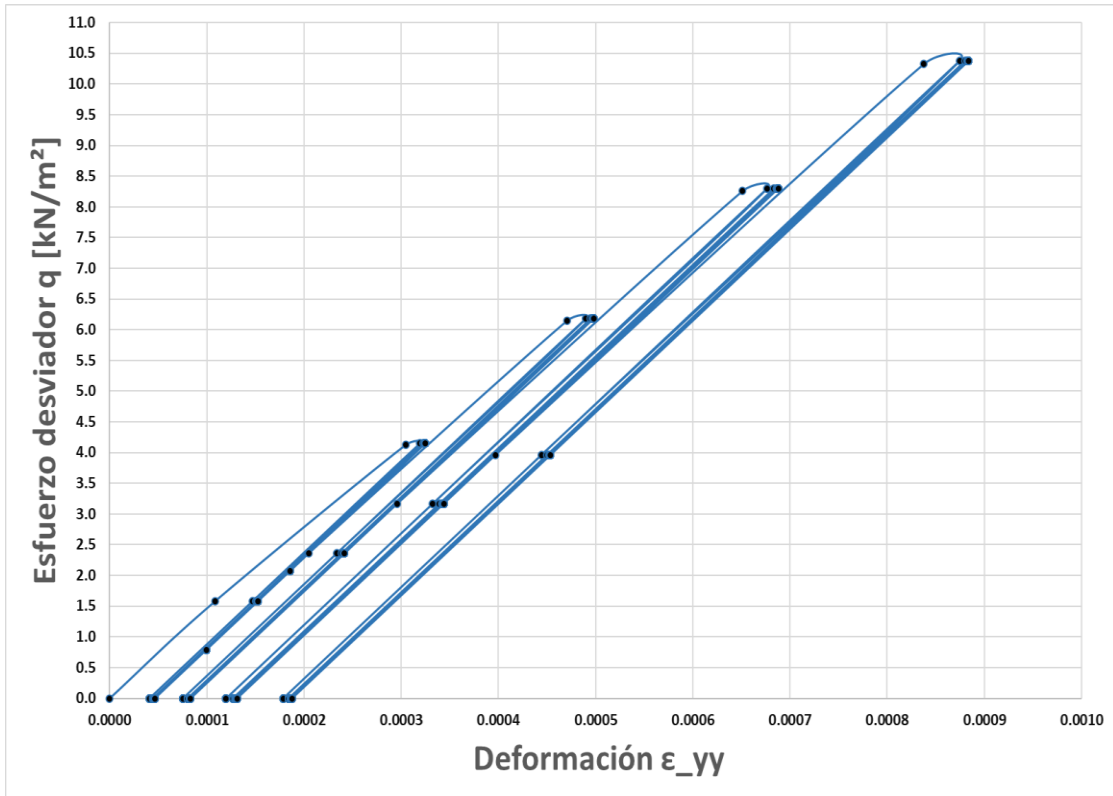


Gráfica 6.6: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=33.12 MPa.

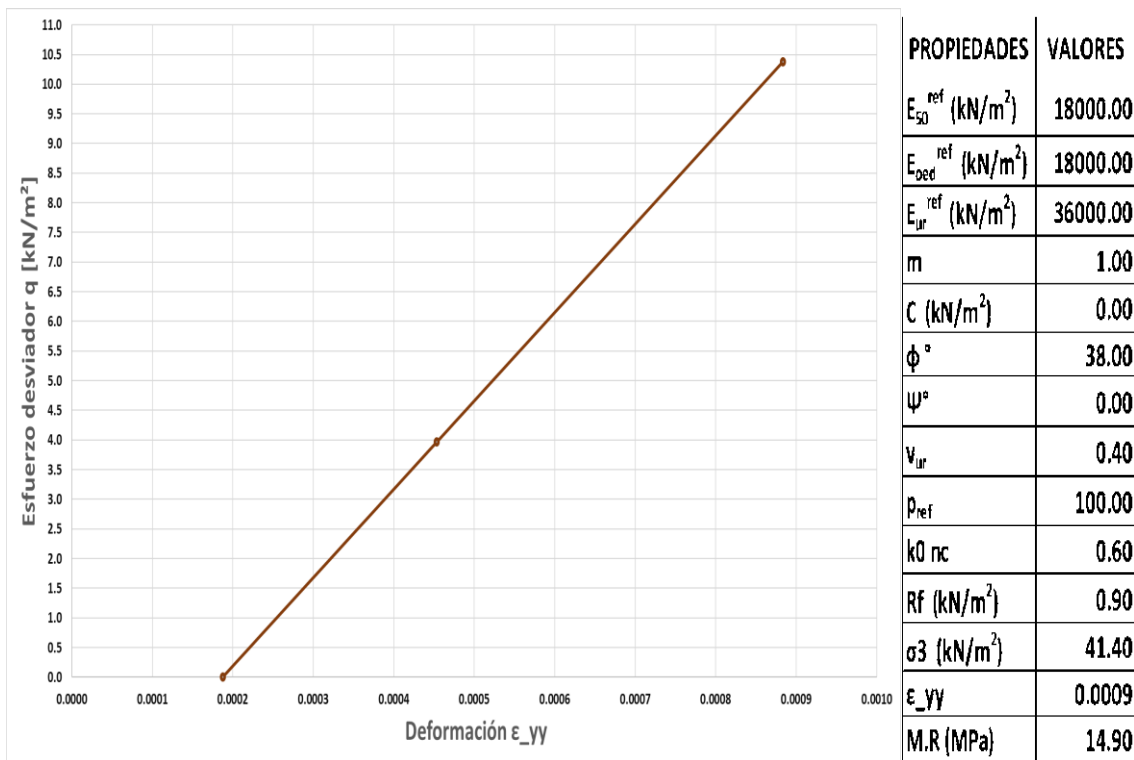
Para la segunda opción de calibración del suelo aproximado (ver gráficas de la 6.7 a la 6.9), se realizaron modificaciones en los siguientes parámetros que son el módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}) y el coeficiente de presión lateral de tierras (k_0 nc), mediante estos parámetros tiene una proximidad mejor al módulo resiliente de la prueba experimental que es de 9.0 MPa.



Gráfica 6.7: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Segunda opción (Elaboración propia).

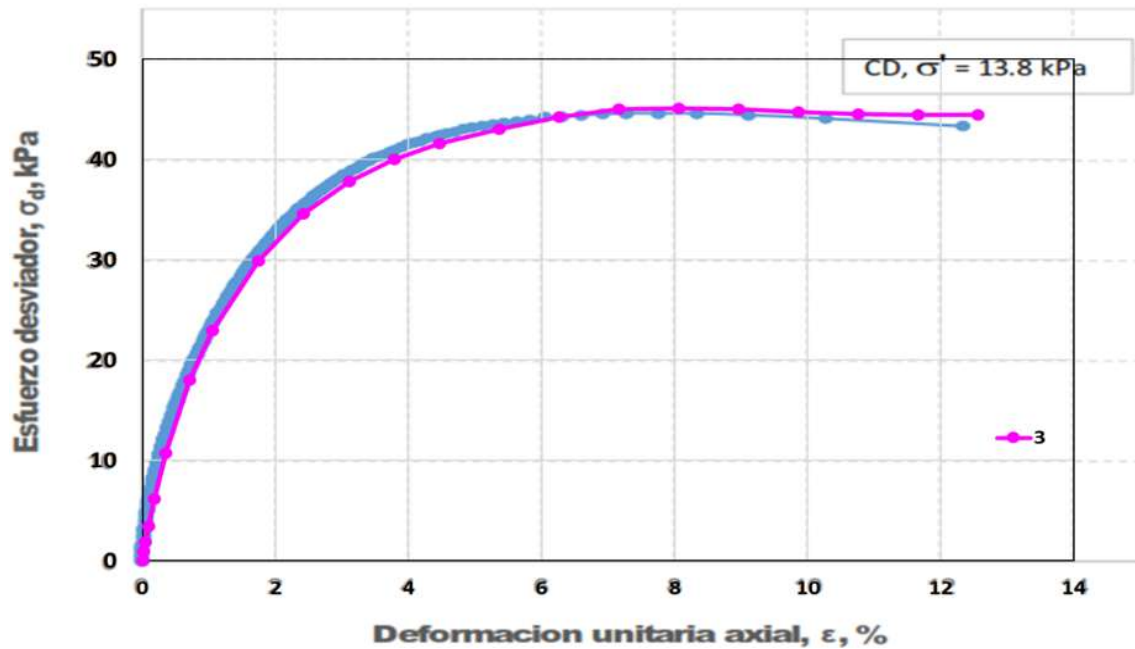


Gráfica 6.8: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=14.90 MPa

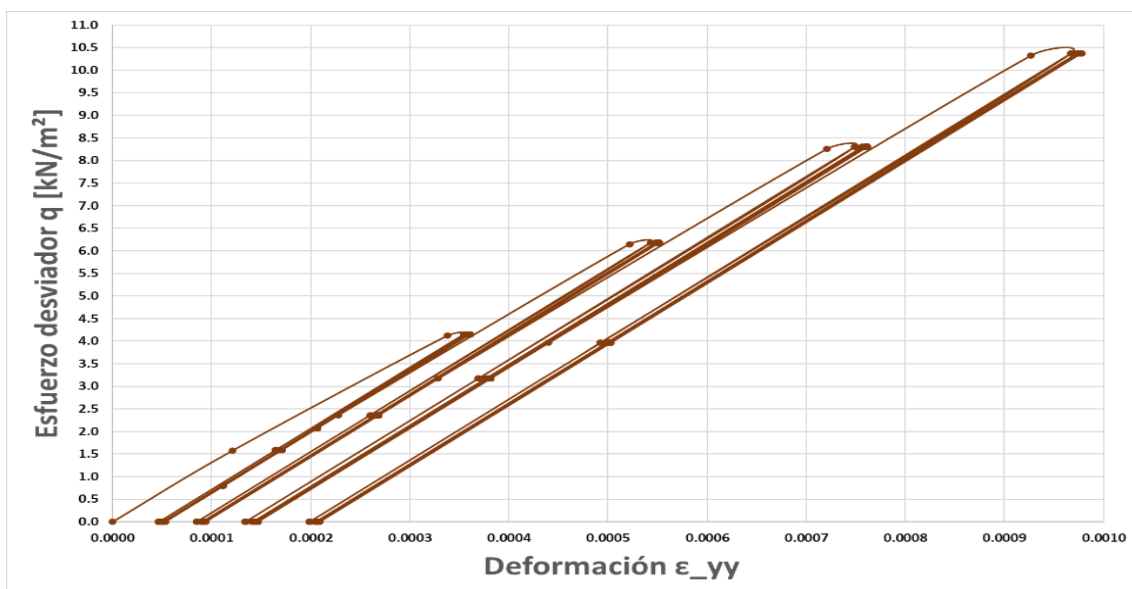


Gráfica 6.9: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=14.90 MPa.

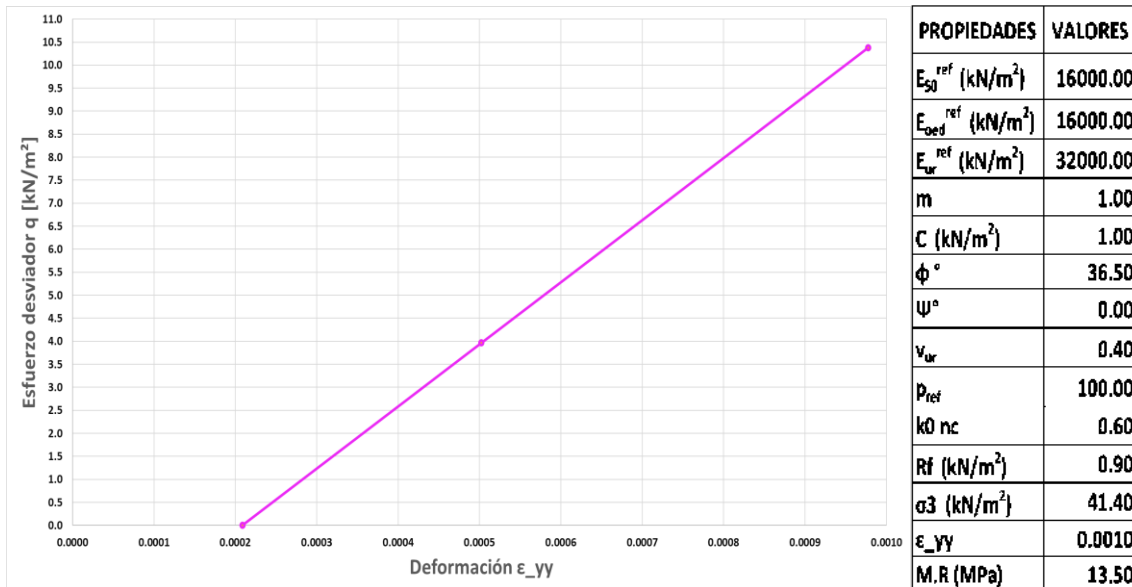
Se continuó realizando simulaciones para obtener un MR de 9.0 MPa, en la que las modificaciones se realizaron en los siguientes parámetros que son: el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}), módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}) y el ángulo de fricción (Φ), esto se muestra en las siguientes gráficas que va de la 6.10 a la 6.12. Lo que se puede observar es que al disminuir estos parámetros se obtuvo un acercamiento al MR experimental.



Gráfica 6.10: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Tercera opción (Elaboración propia).



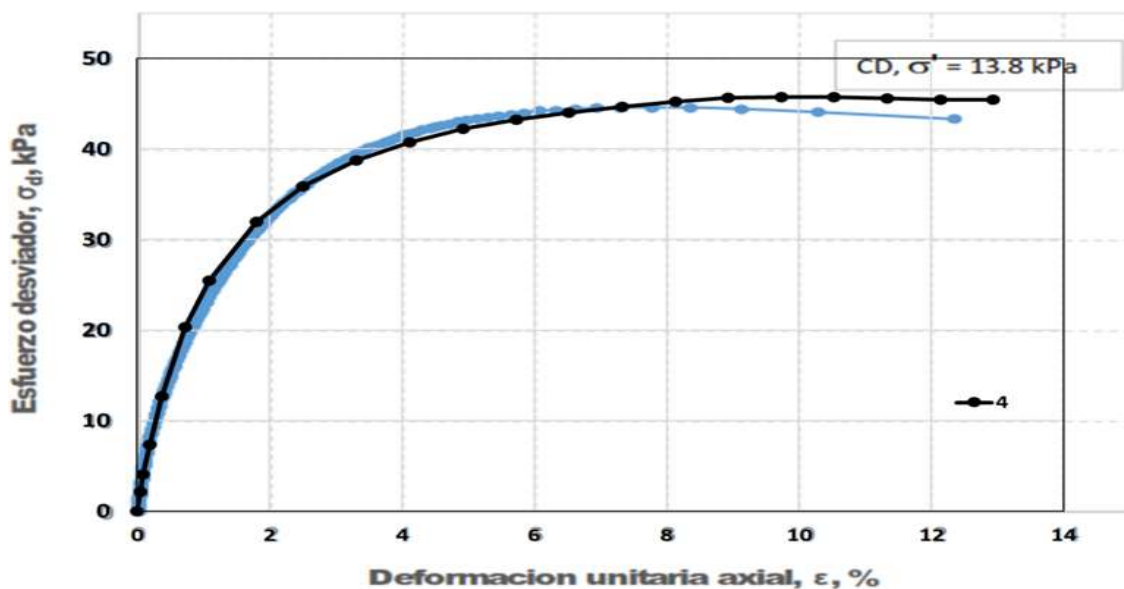
Gráfica 6.11: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=13.50 MPa



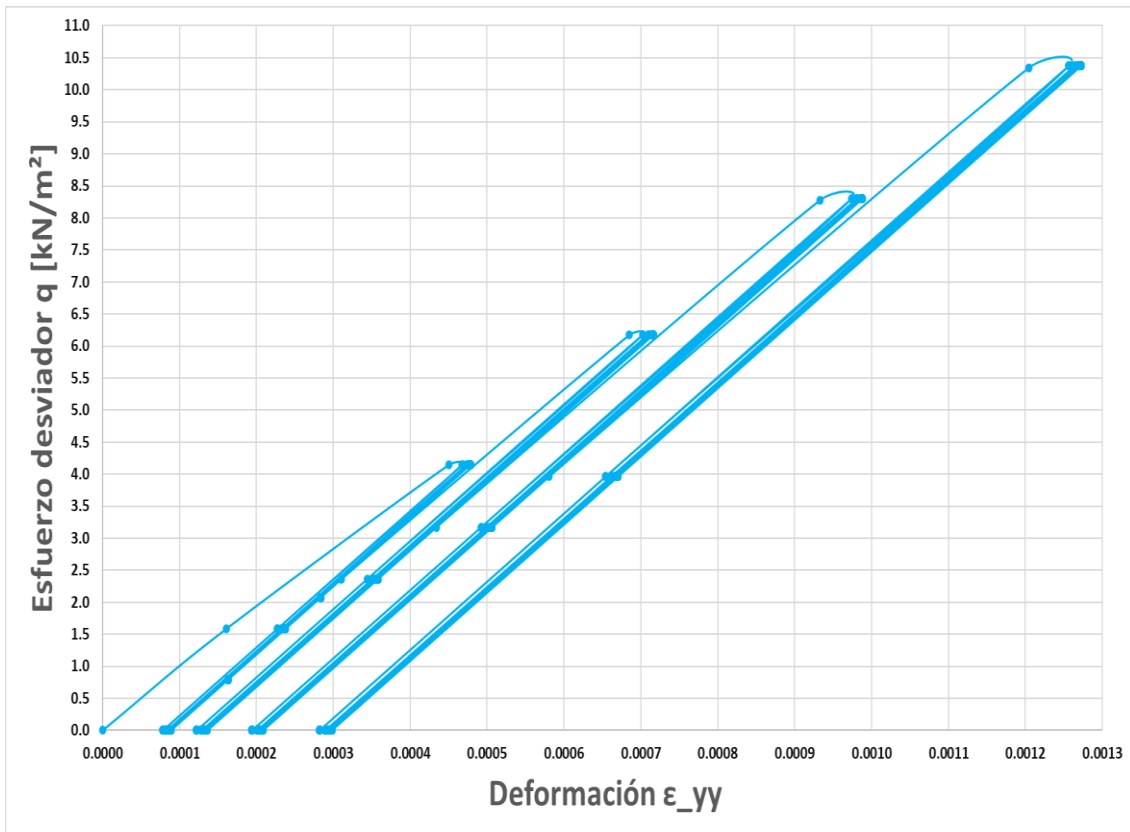
Gráfica 6.12: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=13.50 MPa.

En la siguiente simulación de la calibración del suelo empieza a existir un gran cambio en los parámetros haciendo énfasis en la cohesión en la cual se observa un aumento de 5 unidades y una disminución en el ángulo de fricción, en la que se puede obtener un Módulo resiliente de 10.65 MPa.

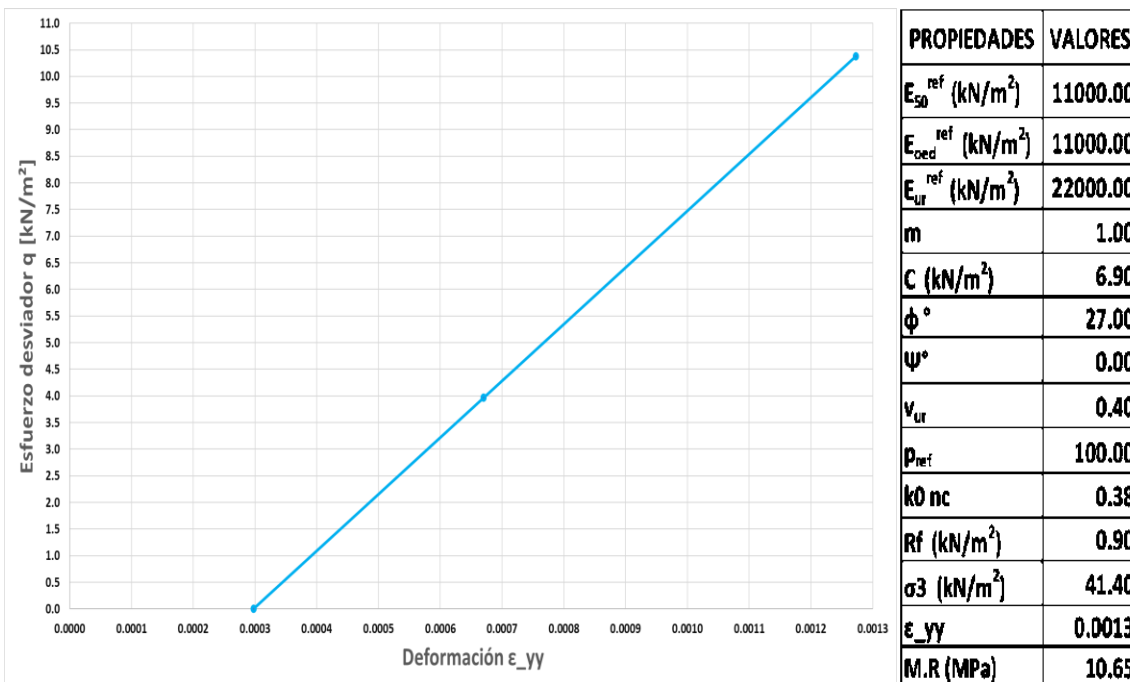
Realizando una disminución en los parámetros que son: el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}) y módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}), se obtiene un MR de 10.65 MPa en la que se aproxima más al módulo resiliente de 9.0 MPa, esto se puede observar en las siguientes gráficas (6.13 al 6.15).



Gráfica 6.13: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Cuarta opción (Elaboración propia).



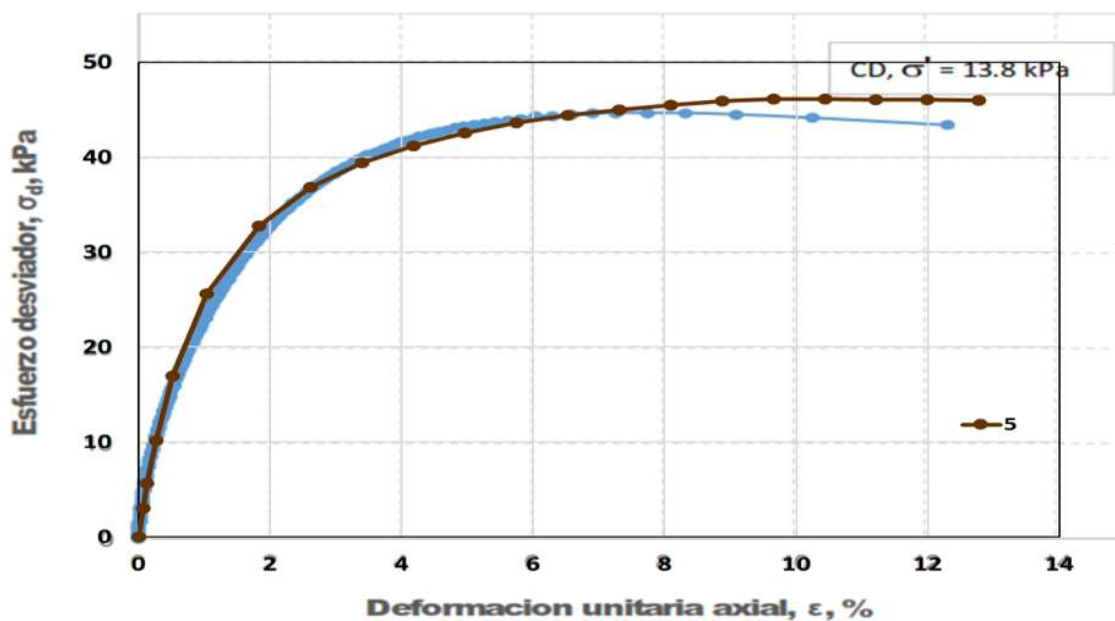
Gráfica 6.14: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=10.65 MPa.



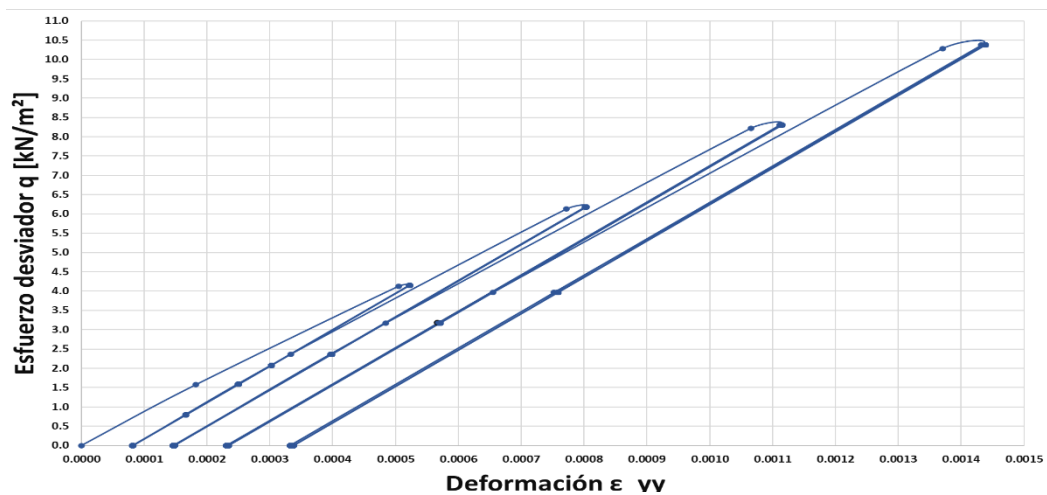
Gráfica 6.15: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=10.65 MPa

Con base a la última simulación se observa que se aproxima al MR experimental, por lo tanto, se vuelve a modificar los mismos parámetros que en el caso anterior haciendo una diferencia entre el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}) y el módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}).

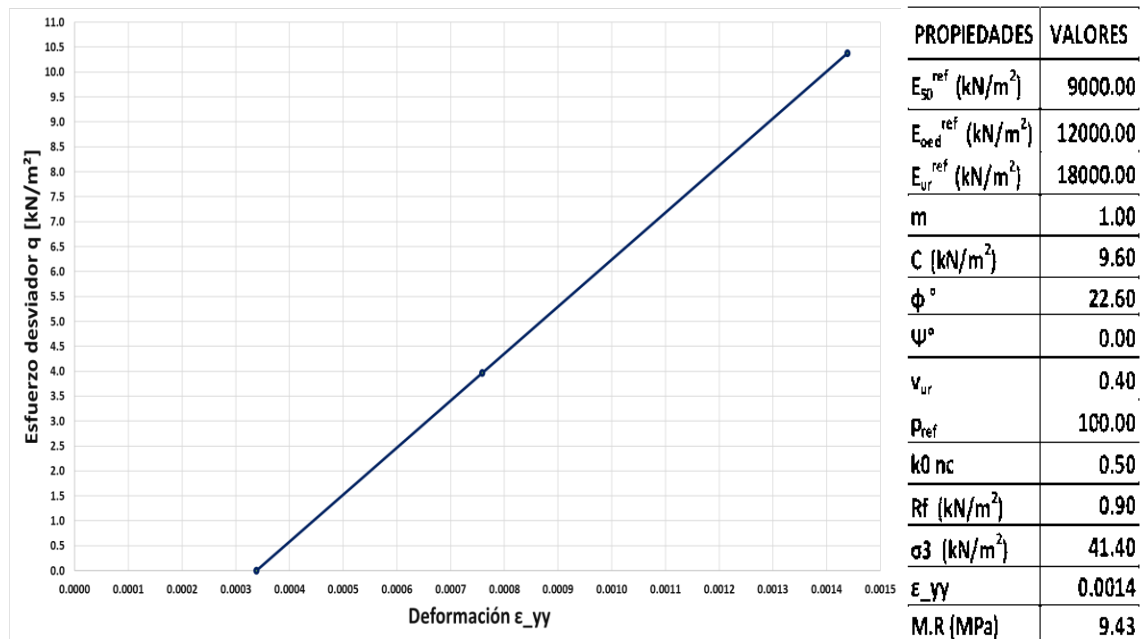
Para la calibración de la curva se mueve el coeficiente de presión lateral de tierras (k_0 nc), que es uno de los parámetros que ayuda a justar la curva y representa el valor del esfuerzo horizontal, con la modificación que se realiza el MR tiene un valor de 9.43 MPa lo cual se muestra en las siguientes gráficas que va del 6.16 a la 6.18.



Gráfica 6.16: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Quinta opción (Elaboración propia)



Gráfica 6.17: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=9.43 MPa.

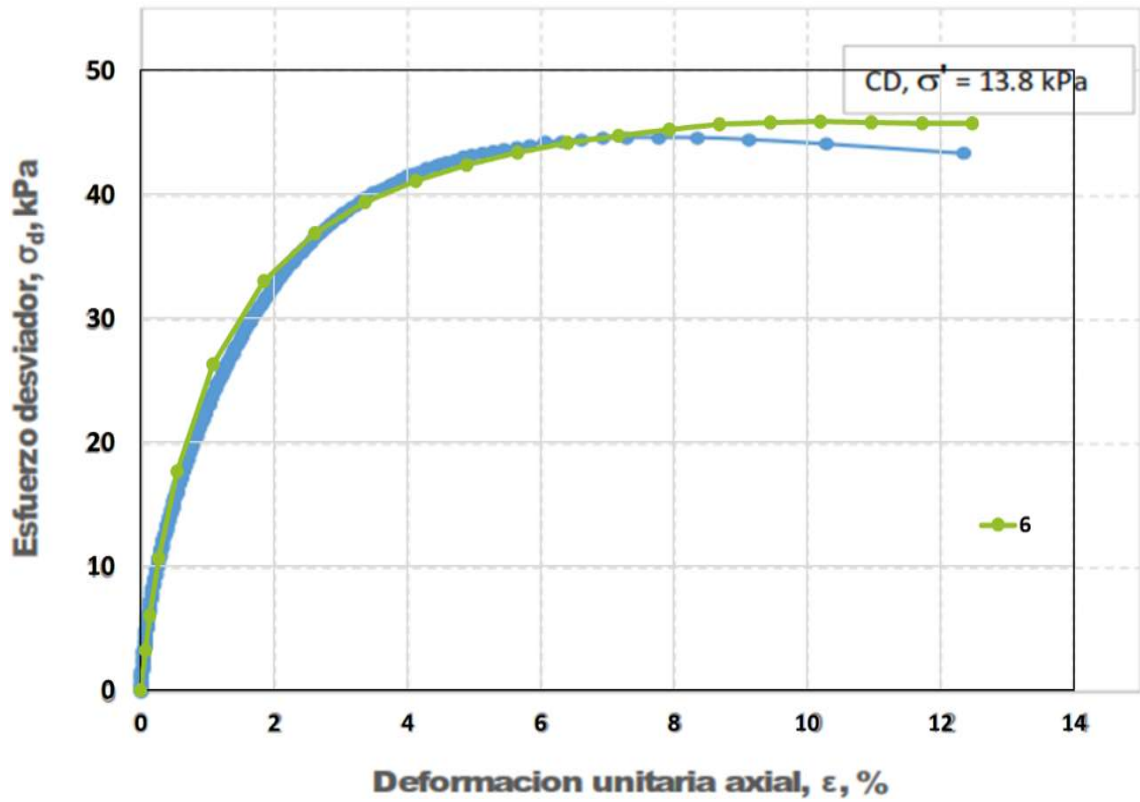


Gráfica 6.18: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=9.43 MPa.

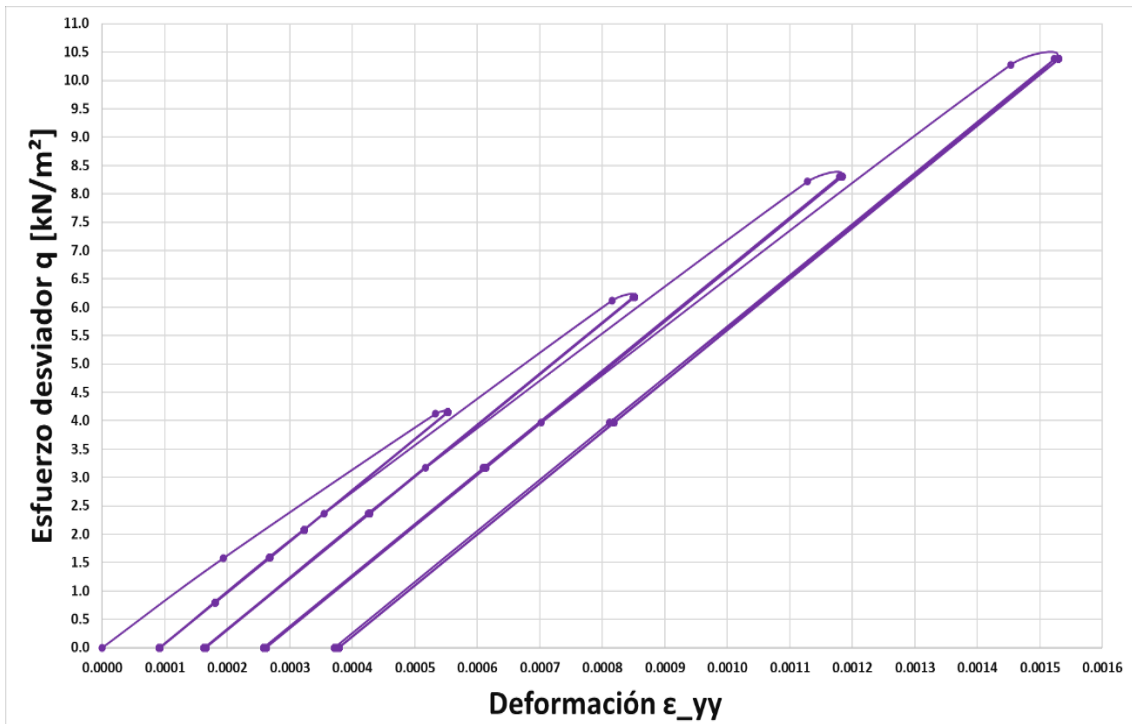
Se realizaron otras simulaciones para llegar al MR experimental, las modificaciones que se realizaron fueron en los siguientes parámetros como: el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}), módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}), cohesión (c) y ángulo de fricción (Φ).

En esta selección los módulos de rigideces son más pequeños a comparación de la primera aproximación, ya que se trata de un limo de alta compresibilidad de las arcillas del ex Lago de Texcoco su resistencia es muy pequeña y se puede observar al conocer los datos de los parámetros de la calibración del suelo.

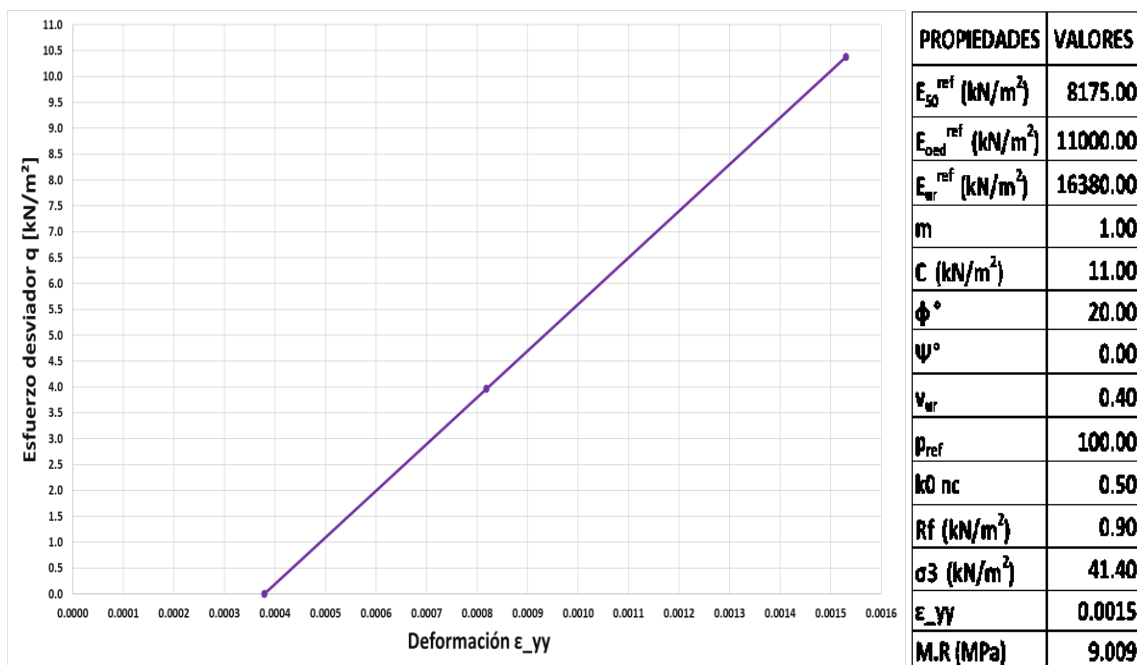
El módulo resiliente experimental es de 9.0 MPa obteniendo el mismo valor para el módulo resiliente numérico, con una deformación unitaria de 0.0015, en la gráfica 6.19 se muestra la calibración del suelo la cual da conocer todos los parámetros que se utilizan en el modelo numérico de la prueba triaxial cíclica en la que se obtiene los módulos resilientes en cada ciclo hasta que el MR se convierte en constante, esto se puede observar en las siguientes graficas que son 6.20 y 6.21.



Gráfica 6.19: Calibración del suelo aproximado del PCA-61, M-2, Prof. 0.50-1.00 m, pista 2. Opción seleccionada (Elaboración propia)



Gráfica 6.20: Comportamiento resiliente de la muestra del suelo- MR=9.0 MPa.



Gráfica 6.21: Parámetros de la muestra del suelo y un MR=9.0 MPa

A continuación, se muestra un resumen de los datos de las calibraciones del suelo que se obtuvo a partir del cálculo de ajuste de la curva que permite evaluar de manera numérica la descripción que se tiene del suelo. La prueba 6 (ver tabla 6.1) es la más representativa de la calibración de suelo que son las condiciones que mejor se ajusta al suelo representado del ex Lago de Texcoco, en donde las demás son pruebas que se llevaron a cabo para evaluar cuales son las condiciones que permitió acercarse a la simulación numérica final.

Parámetros del suelo (Hardening Soil)						
PROPIEDADES	PRUEBAS REPRESENTATIVAS DE CALIBRACIÓN					
	1	2	3	4	5	6
Módulo de rigidez secante de referencia E_{50}^{ref} (kN/m ²)	19000.00	18000.00	16000.00	11000.00	9000.00	8175.00
Módulo de rigidez tangente edométrico E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	19000.00	18000.00	16000.00	11000.00	12000.00	11000.00
Módulo de rigidez recarga-descarga E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	80000.00	36000.00	32000.00	22000.00	18000.00	16380.00
Dependencia al estado de esfuerzos m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cohesión C (kN/m ²)	0.00	0.00	1.00	6.90	9.60	11.00
Ángulo de fricción ϕ°	38.00	38.00	36.50	27.00	22.60	20.00
Ángulo de dilatación ψ°	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Relación de Poisson en descarga-recarga (ν_{ur})	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Esfuerzo de referencia (pref) (kN/m ²)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Coefficiente de presión lateral de tierras (k_0 nc)	0.52	0.60	0.60	0.38	0.50	0.50
Relación de falla (Rf)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Módulo Resiliente M.R (MPa)	33.120	14.904	13.498	10.646	9.429	9.009

Tabla 6.1: Valores de los parámetros de las pruebas calibradas (Elaboración propia).

En la tabla 6.1 se puede observar todos los parámetros que constituyen el modelo constitutivo Hardening Soil, en la que el análisis de la variación de cada uno de los parámetros se dio con la cohesión con un valor de 0 y en el caso del ángulo de fricción con un valor de 48° , en la cual la curva para la calibración queda por muy por arriba de la curva experimental. Por esta razón se observó que se tenía que trabajar con el ángulo de fricción ya que este depende de la uniformidad de las partículas del suelo, del tamaño y forma de los granos.

Se continuó variando el ángulo de fricción que es la pendiente de la línea de falla del criterio de falla de Mohr Coulomb, en donde el valor se fue disminuyendo hasta llegar cerca del 38° , cuando se analizó este valor el resultado fue que la pendiente de la curva fue más parecida a la curva experimental de la calibración. Sin embargo, a la hora de utilizar los parámetros para el modelo numérico de la prueba triaxial cíclico el resultado del módulo resiliente fue de 33.120 Mpa.

Por consiguiente, se realizaron otras calibraciones de suelo en la que los parámetros que se analizaron fueron el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}) y el módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}), este último parámetro fue el que más impacto tuvo ya que su valor disminuyó en un 55% en comparación de la prueba 1, la cual hace referencia a la rigidez del suelo cuando es sometido a trayectorias de recarga-descarga, que corresponde a la presión de referencia (P_{ref}) en la que para un caso práctico Plaxis proporciona el ajuste predeterminado que por defecto tiene un valor de 100 KN/m².

Con base al análisis anterior se observó que se tenía que disminuir los valores de los módulos de rigidez para tener una aproximación al módulo resiliente experimental este fue el caso de la segunda prueba representativa que se muestra en la tabla 6.1 ya que su valor fue de 14.904 MPa, estas variaciones que se realizaron en los parámetros se tomaron en cuenta en reducir el módulo resiliente.

Al seguir realizando calibraciones de suelo se optó por variar la cohesión el cual indica la intersección de la línea de falla del criterio de falla de Mohr Coulomb, el valor de este parámetro se aumentó y dio como resultado que la curva numérica se ajustara más a la curva experimental. Uno de los principales cambios que se vio fue que al aumentar la cohesión el valor del ángulo de fricción disminuye, por lo tanto, la pendiente de falla va disminuyendo al igual que el módulo resiliente.

Al mismo tiempo se variaron los módulos de rigidez en la que como valores típicos promedio se tienen las siguientes relaciones orientativas entre el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}) y el módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}), como se muestra a continuación:

$$E_{oed}^{ref} \leq E_{50}^{ref} \quad \text{o} \quad E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$$

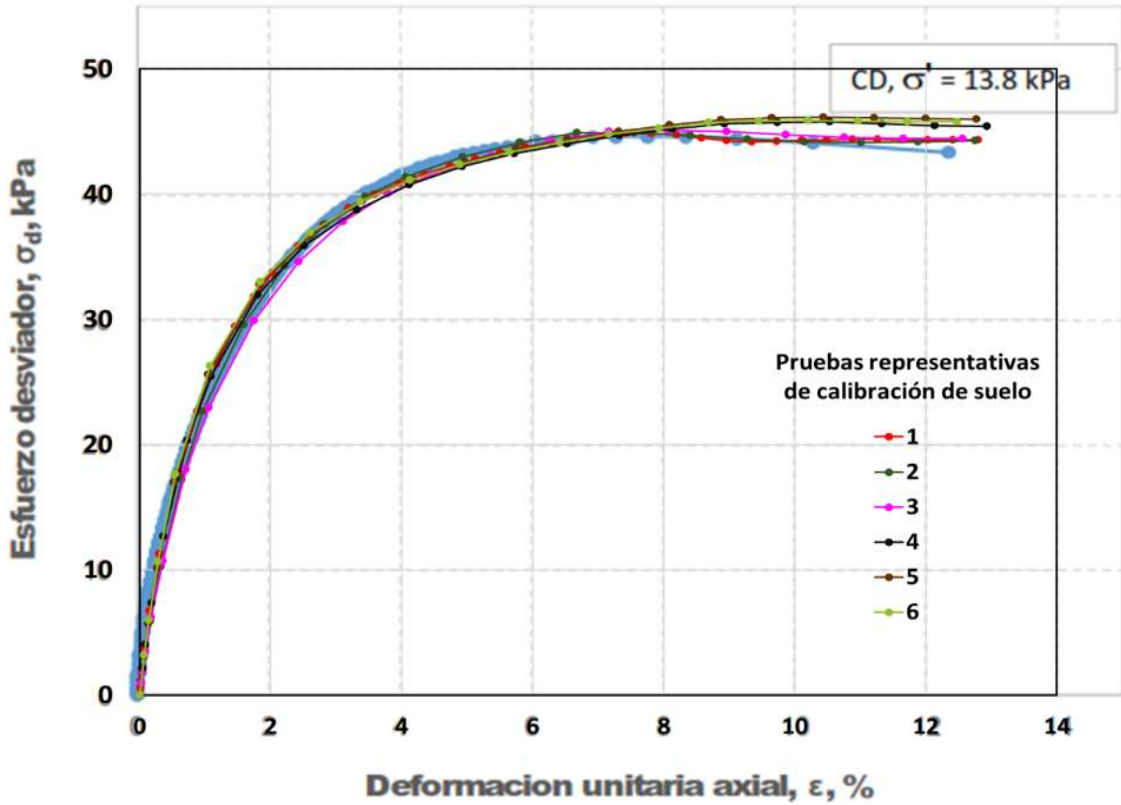
El módulo de rigidez tangente edométrico (E_{oed}^{ref}) tiene que ser igual o mayor que el módulo de rigidez secante de referencia (E_{50}^{ref}), pero no tiene que ser menor porque entonces el programa no continuo hasta que se vuelve a cambiar. Con base al análisis de estas relaciones la modificación de los parámetros se complicó y se volvía a realizar otra simulación para la calibración del suelo como fue el caso de la prueba representativa número 3 en la que se obtuvo un módulo resiliente de 13.498 MPa.

Otro parámetro que se varió es el coeficiente de presión lateral de tierras (K_{0nc}) en el caso de la capa de subrasante es el que le da el valor al esfuerzo horizontal, por ejemplo, si el valor es de 0.3 el esfuerzo horizontal es menor que si valiera un 0.5 y eso quiere decir que es más resistente el suelo al desplazarse lateralmente.

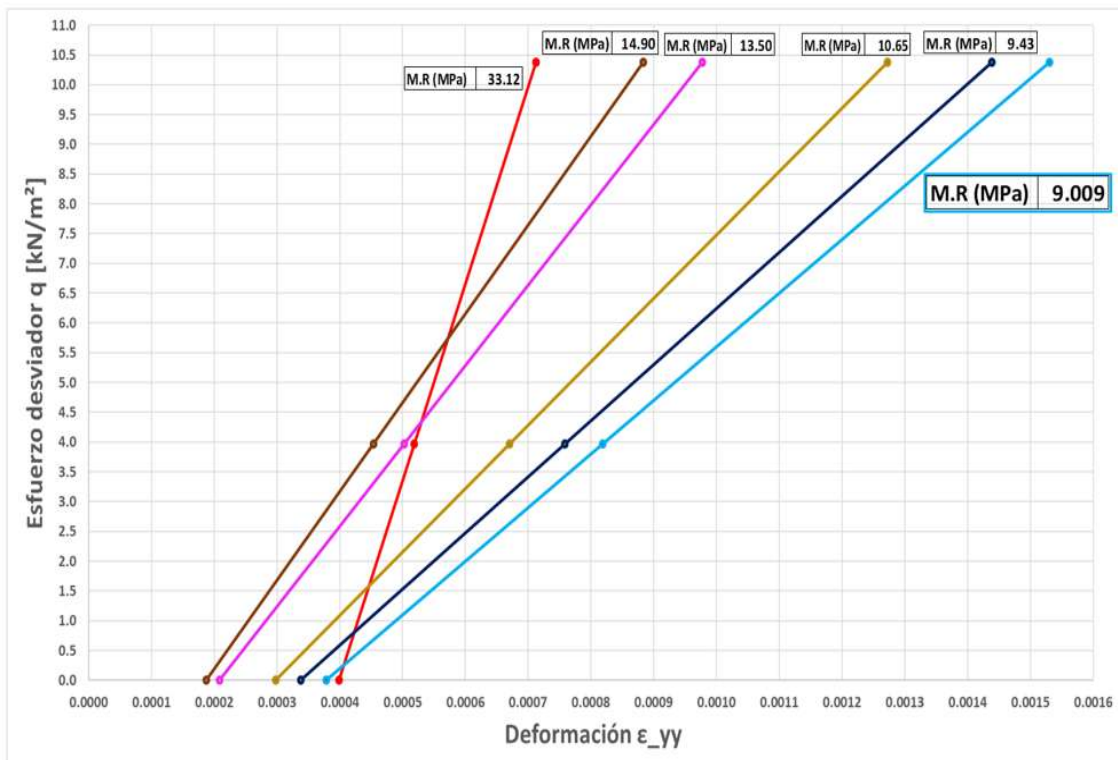
El parámetro de coeficiente de presión lateral de tierras daba el punto clave para ajustar la curva de calibración de suelo, la cual se empezó a variar a partir de 0.2 hasta llegar a un valor de 0.6, sin embargo, se llegó a justar a un valor de 0.5, este fue el caso de las últimas pruebas representativas de calibración del suelo.

En la gráfica 6.22 se puede observar la variación de las curvas de las pruebas de calibración del suelo, principalmente la curva número 6 que es la curva con los parámetros que tiene como módulo resiliente un resultado de 9.0 MPa (ver gráfica 6.23), en donde en comparación de la prueba 1 y la 6 el módulo de rigidez recarga-descarga (E_{ur}^{ref}) tiene una diferencia del 80% al igual que los demás parámetros existe alguna diferencia entre ellos asta poder llegar a la aproximación del módulo resiliente experimental como se muestra en la gráfica .

Al obtener los parámetros de la prueba 6, se continuo con una serie de simulaciones en la que los módulos resilientes fueron similares al valor de 9.0 MPa, por lo tanto, en el caso de los valores de los parámetros son similares en cada uno de ellos como se muestra en la tabla 6.2. Por consiguiente, en la tabla 6.5 se muestra las deformaciones unitarias de cada Módulo Resiliente de las calibraciones de suelos similares.



Gráfica 6.22: Pruebas representativas de calibración de suelo (Elaboración propia).



Gráfica 6.23: Módulos Resilientes de pruebas representativas de calibración de suelo (Elaboración propia).

Parámetros del suelo (Hardening Soil)						
PROPIEDADES	PRUEBAS DE CALIBRACIÓN					
	A	B	C	D	E	6
Módulo de rigidez secante de referencia E_{s0}^{ref} (kN/m ²)	8000.00	8500.00	8250.00	8200.00	8175.00	8175.00
Módulo de rigidez tangente edométrico E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	10000.00	11000.00	11000.00	11000.00	11000.00	11000.00
Módulo de rigidez recarga-descarga E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	16000.00	17000.00	16500.00	16400.00	16350.00	16380.00
Dependencia al estado de esfuerzos m	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cohesión c (kN/m ²)	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00
Ángulo de fricción ϕ °	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Ángulo de dilatación Ψ °	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Relación de Poisson en descarga-recarga (ν_{ur})	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Esfuerzo de referencia (pref) (kN/m ²)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Coefficiente de presión lateral de tierras (k_0 nc)	0.55	0.60	0.60	0.50	0.50	0.50
Relación de falla (Rf)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Módulo Resiliente M.R (MPa)	8.800	9.350	9.075	9.020	8.993	9.009

Tabla 6.2: Valores de los parámetros de las pruebas calibradas con Módulos Resilientes similares (Elaboración propia).

En la gráfica 6.22 la curva 6 de las pruebas representativas de calibración de suelo muestra una relación lineal razonable entre el esfuerzo desviador (σ_d) y la deformación unitaria axial (%) del módulo resiliente experimental y el módulo resiliente numérico, en donde el coeficiente de determinación (R²) es cercano a uno (ver gráfica 6.24), este resultado muestra un excelente ajuste.

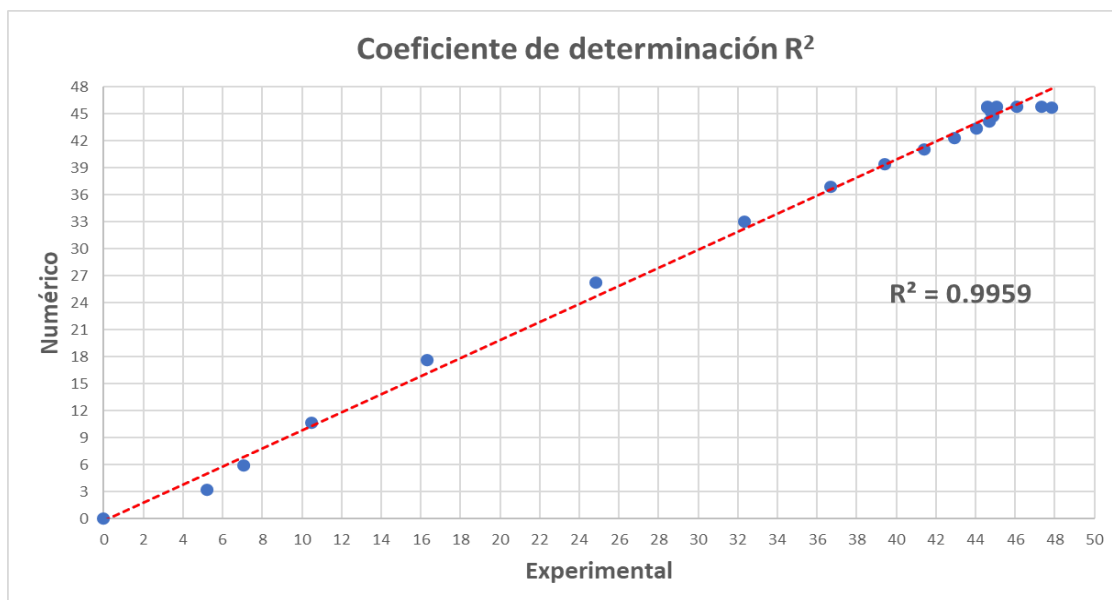
El valor estadístico r de Pearson es de 0.998 (ver tabla 6.3) en la que esta correlación es muy significativa, por lo que se puede afirmar con un 99% de confianza, que en el ámbito de estudio hay una correlación positiva “muy alta” entre la variable simulada y experimental, porque el valor del sig. (bilateral) es menor de 0.01.

Correlaciones

		Experimental	Numérico
Experimental	Correlación de Pearson	1	.998**
	Sig. (bilateral)		<.001
	N	21	21
Numérico	Correlación de Pearson	.998**	1
	Sig. (bilateral)	<.001	
	N	21	21

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 6.3: Correlación de Pearson (Elaboración propia).



Gráfica 6.24: Coeficiente de determinación (Elaboración propia).

La rigidez o deformabilidad de un material determina en gran parte la deformación y los desplazamientos del pavimento, durante el proceso de carga y descarga debido al paso de los vehículos.

Otros de los valores a evaluar son las deformaciones en cada ciclo por cada presión de confinamiento y esfuerzo desviador dando como resultado un módulo resiliente hasta que después de un cierto número de ciclos de carga el Módulo llega a ser aproximadamente constante y al mismo tiempo obtener la deformación unitaria, estos valores se pueden observar en la siguiente tabla 6.4.

Pruebas de calibración de los suelos				
No. Pruebas	Presión de confinamiento σ_3 (kN/m ²)	Esfuerzo cíclico $\sigma_{c\acute{a}lcico}$ (kN/m ²)	Deformación ϵ_{yy}	Módulo Resiliente M.R (MPa)
1	41.4	11.471	0.0007	33.120
	27.6		0.0009	22.080
	13.8		0.0019	11.040
2	41.4	11.471	0.0009	14.904
	27.6		0.0010	9.936
	13.8		0.0017	4.968
3	41.4	11.471	0.0010	13.498
	27.6		0.0011	9.141
	13.8		0.0017	4.784
4	41.4	11.471	0.0013	10.646
	27.6		0.0014	7.972
	13.8		0.0019	5.298
5	41.4	11.471	0.0014	9.429
	27.6		0.0016	7.410
	13.8		0.0020	5.392
6	41.4	11.471	0.0015	9.009
	27.6		0.0016	7.273
	13.8		0.0020	5.537

Tabla 6.4: Valores de deformación unitaria y Módulos Resilientes de las pruebas más relevante.

Pruebas de calibración de los suelos				
No. Pruebas	Presión de confinamiento σ_3 (kN/m ²)	Esfuerzo cíclico $\sigma_{c\acute{a}lcico}$ (kN/m ²)	Deformación ϵ_{yy}	Módulo Resiliente M.R (MPa)
A	41.4	11.471	0.0016	8.800
	27.6		0.0016	7.104
	13.8		0.0019	5.409
B	41.4	11.471	0.0015	9.350
	27.6		0.0015	7.548
	13.8		0.0018	5.747
C	41.4	11.471	0.0015	9.075
	27.6		0.0016	7.326
	13.8		0.0019	5.578
D	41.4	11.471	0.0015	9.020
	27.6		0.0016	7.282
	13.8		0.0019	5.544
E	41.4	11.471	0.0015	8.993
	27.6		0.0016	7.260
	13.8		0.0020	5.527
6	41.4	11.471	0.0015	9.009
	27.6		0.0016	7.273
	13.8		0.0020	5.537

Tabla 6.5: Valores de deformación unitaria y Módulos Resilientes similares (Elaboración propia).

Las deformaciones se presentan de menor a mayor a partir de la prueba 1 hasta la prueba 6, por ejemplo la deformación de la prueba 1 con una presión de confinamiento de 41.4 kPa y un esfuerzo cíclico de 11.471 kPa se presenta una deformación 0.0007 con un módulo resiliente de 33.120 MPa y cuando el valor del módulo resiliente es de 11.040 MPa la deformación es de 0.009 con una presión de confinamiento de 13.8 kPa y el mismo esfuerzo cíclico, este resultado da a conocer que a mayor módulo resiliente menor es la deformación y a mayor deformación menor es el módulo resiliente.

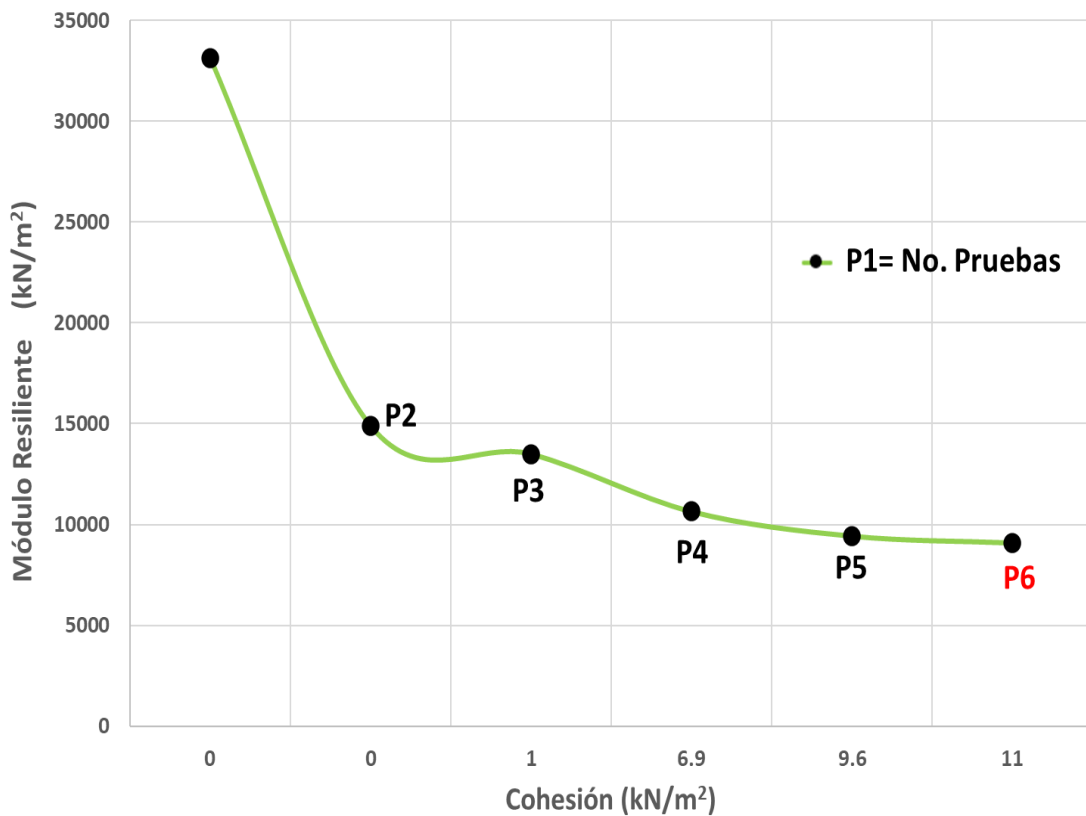
En la prueba 6 con la presión de confinamiento de 41.4 kPa y un esfuerzo cíclico de 11.471 kPa, la deformación es de 0.0015 kPa con un módulo resiliente de 9.009 MPa mientras que cuando se tiene una presión de confinamiento de 13.8 kPa con un esfuerzo cíclico de 11.471 la deformación es 0.002 con un módulo resiliente de 5.537 kPa.

El resultado de las deformaciones unitarias y módulos resilientes se interpretan que cuando el suelo presenta una mayor resistencia su deformación va ser pequeña en caso contrario el suelo colapsaría ya que su deformación sería mayor porque su módulo de rigidez es menos resistente.

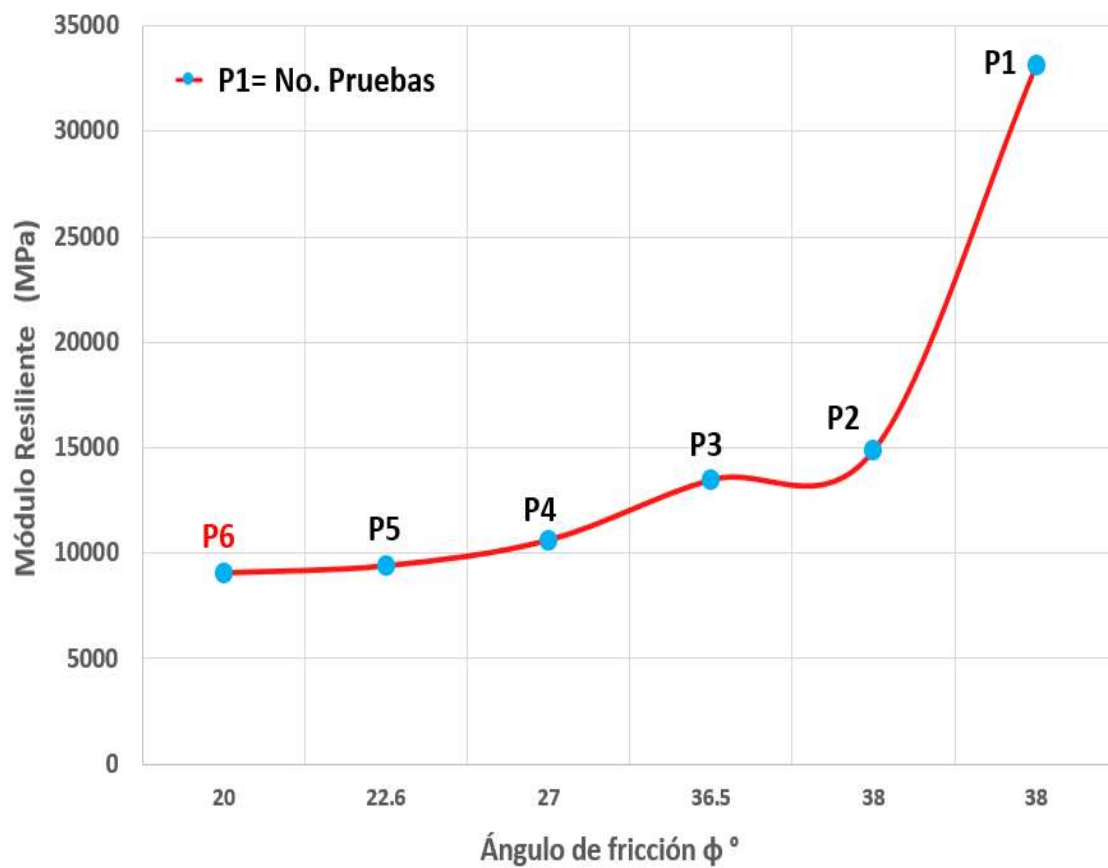
En la siguiente gráfica 6.25 se compara los diferentes módulos resilientes con base a la cohesión en donde se observa que el MR va de mayor a menor hasta llegar a la prueba de calibración 6 mientras que la cohesión va de menor a mayor empezando por el 0 hasta llegar al valor 11. Sin embargo, en la gráfica 6.26 se muestra lo contrario a la gráfica 6.25 ya que el módulo

resiliente va de menor a mayor pero el ángulo de fricción de la prueba de calibración número 6 tiene un valor de 20° hasta llegar a un valor de 38° . Lo que se comprende es que mientras que la cohesión es mayor el ángulo de fricción es menor para la prueba de calibración seleccionada y que por lo regular nunca van a coincidir.

En el anexo se muestran gráficas en la que principalmente se observa los módulos resilientes con los diferentes parámetros de rigidez y la comparación de las diferentes pruebas de calibración de los suelos entre las que el módulo resiliente varía y las que son similares con base a la prueba seleccionada así como sucede con los parámetros de cada una de las pruebas.



Gráfica 6.25: Relación entre el Módulo Resiliente y la cohesión (Elaboración propia).



Gráfica 6.26: Relación entre el Módulo Resiliente y el ángulo de fricción (Elaboración propia).

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

7.1 Conclusiones

La teoría de elementos finitos ha transformado el campo de la ingeniería civil, por eso se hace obvio el interés que ha sido para la ejecución de proyectos, una vez calibrados los parámetros de la simulación se puede analizar el comportamiento del material ante distintas cargas de esfuerzo desviador y presión de confinamiento. Por lo tanto, se determinó el valor del módulo de resiliencia numéricamente de la muestra de suelo provenientes del ex Lago de Texcoco.

En este estudio se comparó el comportamiento del suelo del ex Lago de Texcoco bajo el pulso haversiano, realizando pruebas triaxiales cíclicas a distintos niveles de esfuerzo desviador y presión de confinamiento, entre el módulo resiliente experimental y el módulo resiliente numérico.

Del trabajo desarrollado, de acuerdo a los resultados de la simulación numérica se puede derivar las siguientes conclusiones principales:

- ✚ Se planteó una simulación numérica de una prueba triaxial cíclica consolidada drenada (CD) mediante el modelo de elementos finitos Plaxis®, este permite reproducir de manera satisfactoria el proceso de carga – descarga en términos de la curva de deformación axial vs esfuerzo desviador (q).
- ✚ Los resultados de cada simulación numérica al principio nos daban un acercamiento al módulo resiliente experimental que indica la deformabilidad del suelo que depende principalmente del esfuerzo desviador, de la presión de confinamiento y de cada uno de los parámetros del modelo constitutivo Hardening Soil.
- ✚ Al hacer modificaciones de cada uno de los parámetros obtenidos, se dan como resultado variaciones que permite un análisis más preciso de la exactitud con la que se simula el modelo constitutivo Hardening Soil de programa Plaxis y el comportamiento de la muestra simulada.

La obtención de los parámetros es de vital importancia, ya que se necesita de estos para los resultados dados por las simulaciones. En el logro de las curvas histeréticas resultantes se hace claro el comportamiento no lineal de los suelos del el Lago de Texcoco bajo los niveles de carga cíclica inducidos.

- ✚ La simulación mediante el modelo de elementos finitos permitió numéricamente reproducir resultados aproximados del valor del módulo resiliente del suelo de subrasante de la prueba triaxial cíclica de laboratorio del caso de estudio, utilizando el modelo constitutivo Hardening Soil.
- ✚ Se identificó la influencia de cada una de los parámetros del como impactan en el módulo resiliente, mediante la calibración del suelo.
- ✚ En el modelo de la prueba triaxial numérica se obtiene un valor máximo aproximado de 9.009 MPa del módulo resiliente aplicando una presión de confinamiento de 41.4 kPa, encontrando una similitud con el valor del módulo resiliente máximo del suelo que fue tomado como caso de estudio es de 9.0 MPa de la prueba triaxial cíclica experimental.
- ✚ Los resultados muestran que la deformación que experimentan un suelo queda definida por el esfuerzo máximo aplicado.

7.2 Trabajo futuro

La experiencia de trabajar en esta investigación me queda muy claro que día a día se actualiza la información y la importancia de utilizar sistemas de simulación en la actualidad. Sin embargo, para este estudio es necesario darle un seguimiento al trabajo presentado en esta tesis para obtener Módulos Resilientes de diferentes tipos de suelos, y de esa manera construir una base de datos que contenga los diversos rangos de Módulos Resilientes al alcance de toda persona para que sean interpretados y utilizados en los diferentes contextos. Para lograr este objetivo se tienen que realizar diferentes trabajos entre los que se encuentran son los siguientes:

- ❖ Es necesario generar las reglas que determinen un sistema automático para la configuración de la calibración del suelo para facilitar la obtención de los parámetros del mismo y de tal forma para que sea más interactivo con el usuario, ya que estos datos son imprescindibles para llevar a cabo la simulación numérica de la prueba triaxial cíclica.
- ❖ Probar la simulación con diferentes tipos de suelos y verificar que la metodología que se está proponiendo para la prueba triaxial se aplique a distintos tipos de suelos.
- ❖ La simulación que se realiza mediante la metodología propuesta para el desarrollo del modelo de elemento finito se obtiene la aproximación del módulo resiliente. Por lo tanto, se propone que se realice un catálogo de los rangos de los módulos resilientes para diferentes tipos de suelos con el fin de que esto contribuya a construir pavimentos de calidad para el beneficio de la sociedad.

La motivación de esta tesis al principio fue estudiar la estructura de las secciones que proporciona el Catálogo de secciones Estructurales de Pavimentos para Carreteras de la República Mexicana, que ofrece espesores de cada tipo de pavimento que utilizaría un proyectista. Sin embargo, los espesores y propiedades de las capas de una estructura de pavimento son altamente determinados por la rigidez de la subrasante, entonces se propone determinar mediante un método mecanicista los esfuerzo y deformaciones en las capas del pavimento, utilizando para el análisis también el método de elementos finitos con el fin de estudiar el comportamiento de las capas de las secciones estructurales.

Por lo tanto, otro trabajo interesante consiste en desarrollar un modelo de secciones críticas mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), para analizar la componente mecanicista de la subrasante en la estructura del pavimento.

Referencias bibliográficas

- A.M, R., & K.P, G. (November de 2005). Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design. San Luis Obispo, USA: Civil and Environmental Engineering, California Polytechnic State University.
- AASHTO T 307-99. (2012). Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. *Standard Method of Test for*.
- Ahmed, A., & Elsanabary, M. (2013). Finite Element Modelling and Laboratory Determination for the Elastic Modulus of Granular Waste Materials. *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Aswan University, Egypt*. Montreal, Québec.
- Batista, A. (2014). Chequeo de estructuras de pavimentos flexibles a través del software (MEPDG). Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Facultad de Construcciones.
- Boussinesq, M. (1885). *Application des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Paris: Gauthier-Villars.
- Brizuela, L., Alderete, N., & Rivera, J. (2013). Procedimiento de moldeo para suelos granulares complementarios a la norma AASTHO T 307 para el ensayo de módulo resiliente de suelos viales. *LEMaC, Centro de Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata*. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Bujang, H., JamaIloddin, N., & Moh'd, J. (s.f.). A review of basic soil constitutive models for geotechnical application. Department of Civil Engineering, University Putra Malaysia, Selangor, Malaysia.
- Burmister, D. (1945). The general theory of stresses and displacements in layered systems. *Journal of Applied Physics.*, 89-94.
- Burmister, D., & et al. (1943). *The theory of stress and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways*.
- Camacho, J., Molina, F., & Reyes, O. (Noviembre de 2015). Simulation of traffic loading on an embankment by the finite element method. *Nueva Granada Military University*. Bogota D.C., Colombia: doi:10.3233/978-1-61499-601-9-737.
- Chaves, S. (Junio de 2017). *Comparación de valores de módulo resiliente en suelos de subrasante obtenidos por ensayo de campo y laboratorio*. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San

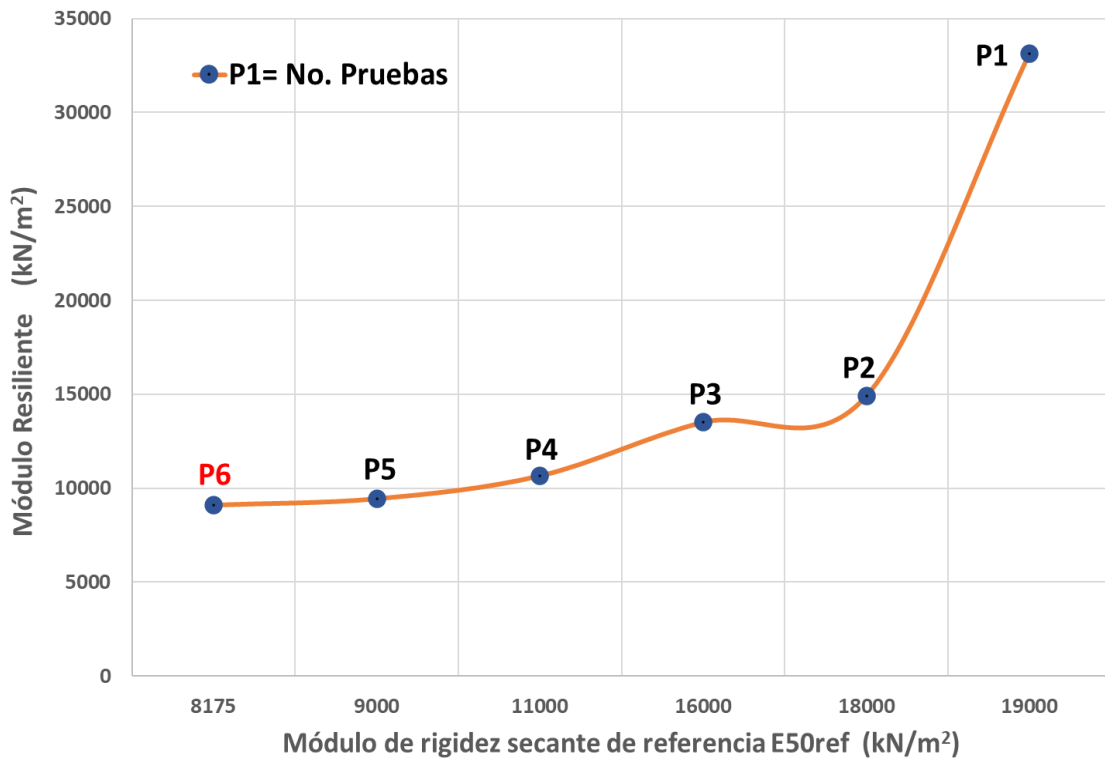
- Jose, Costa Rica: Proyecto de Graduación. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería Civil.
- Daehyeon , K., & Jong Ryeol, K. (September de 2006). Resilient behavior of compacted subgrade soils under the repeated triaxial test. Indiana Department of Transportation (INDOT). Department of Civil Engineering, Chonnam National University.
- Dotti, R. E. (Diciembre de 2008). Instalación, verificación de la calibración y aplicación del Ensayo Triaxial del CIVCO utilizando diferentes tipos de suelo. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería en Construcción.
- El Howayek, A., Muschett, D., Nantung, T., Lee, J., Santagata, M., & Bobet, A. (2016). *Verification of the enhanced integrated climatic module soil subgrade input parameters in the MEPDG*. West Lafayette: Purdue University. DOI: 10.5703/1288284316331.
- Erlingsson, S. (July de 2014). Performance Modelling of Flexible Pavements Tested in a Heavy Vehicle Simulator. Faculty of Civil and Environmental Engineering. University of Iceland.
- Garnica Anguas, P., & Gómez López, J. (2001). *Deformaciones permanentes materiales granulares para la sección estructural de carreteras*. Instituto Mexicano del Transporte, (176), 46.
- Garnica, P., & Correa, A. (2004). Conceptos mecanicistas en pavimentos. *Publicación Técnica No 258*.
- González, O., Herrera, M., Iglesias, C., & López , E. (Septiembre de 2013). Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos.
- Gonzalez, O., Herrera, M., & al., e. (2013). *Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos*. Villa Clara, Cuba: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Central de las Villas.
- Hernández, D., & Poveda, W. (2013). *Simulación del ensayo triaxial mediante un programa de elementos finitos*. Bucaramanga, Colombia: Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.
- Hernández, V., Equihua, L., Leal, J., Saldaña, N., Diosdado, J., & Saldaña, A. (2019). Simulación de la prueba triaxial de un suelo agrícola mediante el método de elemento finito. *CiBlyT*, año 14, número 42.

- Herrera, M. (Septiembre de 2014). Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios AASHTO 1992 y 2002. Lima: Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Programa Master en Ingeniería Civil.
- Herrera, M., & et al. (2008). *Simulación mediante el Método de Elementos Finitos de la respuesta mecánica de un Oxisol*. Habana, Cuba: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.
- Hidalgo, C., & Rodríguez, M. (2004). Proyecto mejoramiento de suelos con cal. Universidad de Medellín. Sin publicar.
- Juarez, E., & Rico, A. (s.f.). *Mecánica de suelos*. Limusa, 1976.
- Khoury, N., & Zaman, M. (2004). *Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils*. . Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1874(-1), 99–107. doi:10.3141/1874-11.
- Leiva, P., Loria, L., & Navas, A. (Noviembre de 2011). Comparación entre modelación de respuestas de pavimentos flexibles con análisis de multicapa elástica y elemento finito. Rio de Janeiro, Brasil.
- Lerma T., C. (Enero de 2017). *Determinación del módulo de resiliencia de las arcillas del ex Lago de Texcoco*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Ingeniería Civil-Geotécnica.
- M. Budhu. (2007). *Soil mechanics and foundations*. 2da. Ed. John Wiley and Sons.
- M.D.Braja. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Editores S.A.
- Mahmoud, O., & Ahmed, M. (2015). Finite Element Modelling of Flexible Pavement. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*., 6.
- Menéndez, J. (2016a). *Ingeniería de pavimentos - Materiales*. 5ta. edición. Lima: ICG. PT-47. ISBN 978-612-4280-15-3. PT-47.
- Minaya, S., & Ordoñez, A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. 2da. Lima, Perú: Instituto de la Construcción y Gerencia - ICG. .
- Molenaar, A. A. (July de 2018). *Design of Flexible Pavements*.
- Morales, P., Chávez, O., & López, L. (Febrero de 2009). *Efectos de la alta compactación de la capa de base en pavimentos flexibles*. Managua, Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de la Tecnología de la Construcción.

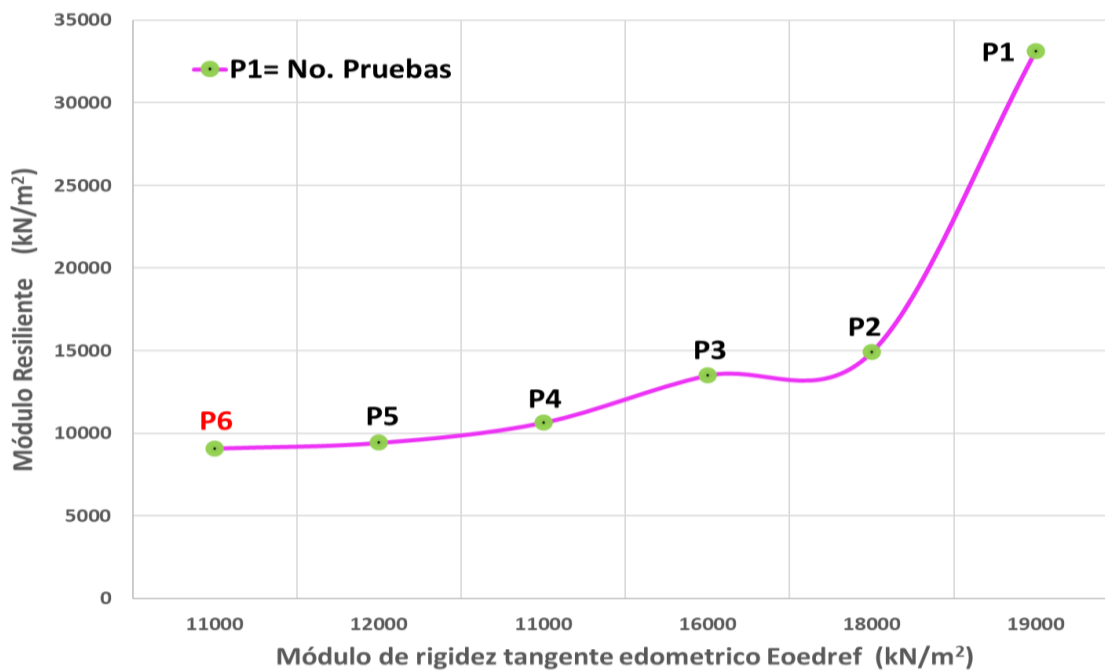
- Moreno, J. (22 de Julio de 2016). Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Barcelona, España: Tesina. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2099.1/3252>.
- Nieto, A., Camacho, J. F., & Ruiz, E. F. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17.
- NORMA INV. E-156-07. (s.f.). *Instituto Nacional de Vías*.
- Pandales, C., & Pedroza, B. (2009). *Calibración de módulos resilientes de suelos estabilizados con cal a partir de ensayos de placa y viga benkelman*. Universidad de Medellín. Programa de Ingeniería Civil.
- Pérez, S. C. (Febrero de 2008). Puesta a punto de un equipo triaxial cíclico para módulo de resiliencia. Morelia, Michoacán, México: Maestría en infraestructura del transporte en la Rama de las Vías Terrestres.
- Reyes, Ó., & Camacho, J. (Julio de 2004). Comparación del cálculo de una estructura de pavimento flexible por elementos finitos y cálculo teórico.
- Rojas, L. (14 de Junio de 2014). *Evaluación del módulo resiliente y deformación permanente en material arcilloso con de material friccionante*. Bogota, Colombia: Proyecto de investigación. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería.
- Romero, T. (Enero de 2018). Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del ex lago de Texcoco. México: Dirección General de Bibliotecas de la UNAM.
- Rondón, H., & Reyes, F. (24 de Septiembre de 2007). *Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento*. Medellín, Colombia: Revista Ingenierías, Universidad de Medellín.
- Sandoval, E., & Rivera, W. (Junio de 2019). Correlación del CBR con la resistencia a la compresión confinada. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, pp. 135-152. <https://doi.org/10.18359/rcin.3478>.
- SCT. (2001). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. Sanfandila, Querétaro: Publicación técnica No. 142.
- Shabbir, M., & Soo, W. (2014). Estimation of subgrade resilient modulus using the unconfined compression. *Innovation & Research.*, 39.

- Shen, J., & Kushwaha, R. (1988). *Soil-machines interactions. A finite element perspective*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Uthus, L. (May de 2007). *Deformation Properties of Unbound Granular Aggregates*. Trondheim, Noruega: Norwegian University of Science and Technology. NTNU Innovation and Creativity.
- Von, H., & Killingsworth, B. (1997). *Design pamphlet for the determination of design subgrade in subgrade in support of the Aashto guide for the design of pavement structures*. Austin TX.: Brent Rauhut Engineering Inc.

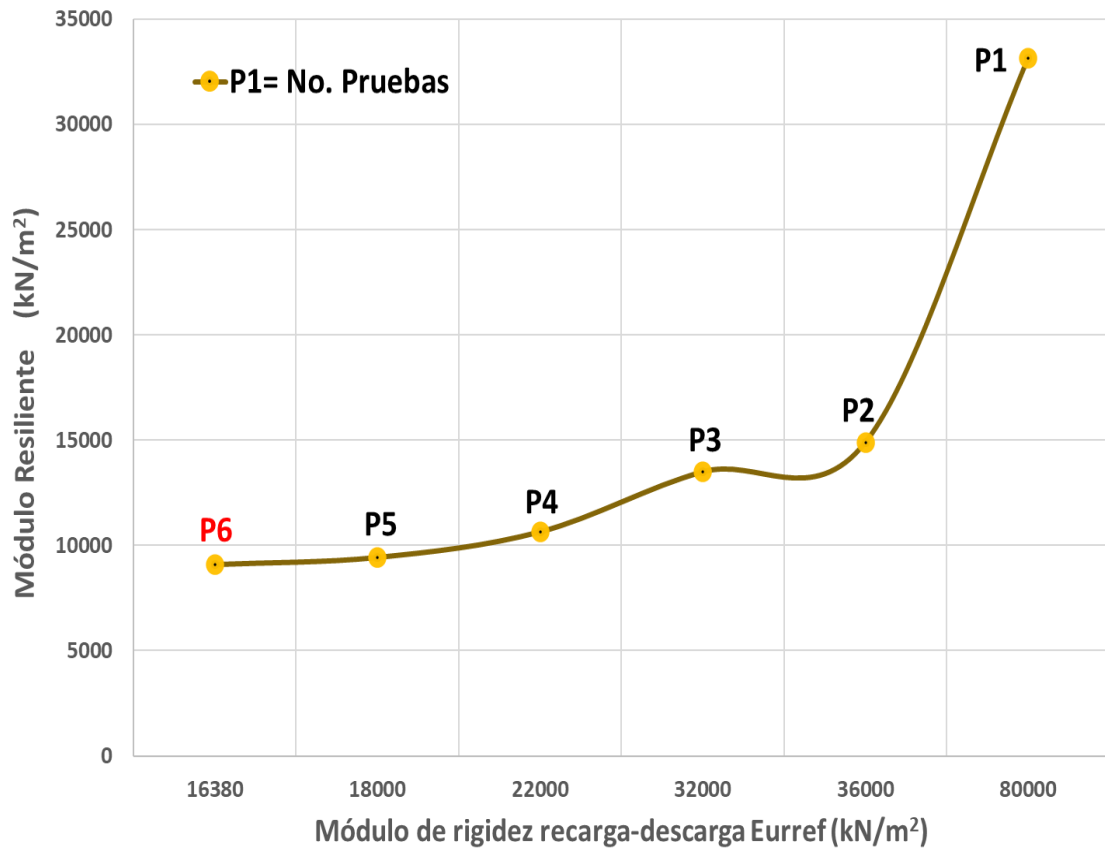
Anexos



Gráfica: Relación entre el Módulo Resiliente y el módulo de rigidez secante de referencia (Elaboración propia).



Gráfica: Relación entre el Módulo Resiliente y el módulo de rigidez tangente edométrico (Elaboración propia).



Gráfica: Relación entre el Módulo Resiliente y el módulo de rigidez recarga-descarga

