

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Construcción

Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible
(arcillas).

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Jordy Iván García Quirós

Ciudad de México, octubre 2019.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Alonso Poveda Montoya, Ing. Ivannia Solano Aguilar, Ing. Alexandra Ossa López, Ing. Mario Flores Guzmán, Ing. Rafael Baltodano Goulding, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



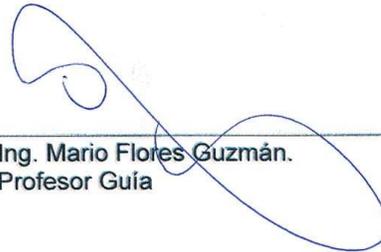
Ing. Alonso Poveda Montoya.
En representación del Director



Ing. Ivannia Solano Aguilar.
Profesora Guía



Ing. Alexandra Ossa López.
Profesora Guía



Ing. Mario Flores Guzmán.
Profesor Guía



Ing. Rafael Baltodano Goulding.
Profesor Lector



Ing. Sonia Vargas Calderón.
Profesora Observadora

Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible (arcillas)

Abstract

In order to evaluate the influence of secondary consolidation on the dynamic stiffness of a compressible soil, consolidated undrained (CU) triaxial dynamic tests were carried out on soil specimens recovered from the old lake of Texcoco, which correspond to a clay soil.

The tests consisted of two stages. First, the specimens were subjected to a defined effective stress (σ'); once the primary consolidation, a stage in which pore pressure is dissipated, measurements were made of the equivalent dynamic module of Young (E_{eq}) and resilient module (M_r) at different levels of deviating stress, applying a periodic sinusoidal and haversian pulse, respectively. Once these modules were determined, the material continued to be consolidated with the same level as σ' , in order to establish the influence of the consolidation time on the magnitudes of these. Therefore, two additional measurements were made every 24 hours, thus allowing the variation of the modules throughout the secondary consolidation process to be obtained.

The previous procedure was carried out at different levels of effective effort or consolidation, including loading and unloading stages of the compressibility curve.

Keywords: Stress deviator, secondary consolidation, dynamic stiffness, Young dynamic equivalent module, resilient module, dynamic triaxial tests.

Resumen

Con el objetivo de evaluar la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible, se llevaron a cabo pruebas triaxiales dinámicas consolidadas no drenadas (CU), en probetas de suelo recuperadas en el antiguo lago de Texcoco, las cuales corresponden a un suelo arcilloso.

Las pruebas consistieron en dos etapas. Primero, las probetas se sometieron a un esfuerzo efectivo (σ') definido; una vez concluida la consolidación primaria, etapa en la cual se disipa la presión de poro, se realizaron mediciones del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y módulo resiliente (M_r) a distintos niveles de esfuerzo desviador, aplicando un pulso periódico senoidal y haversiano, respectivamente. Una vez determinados dichos módulos, se continuó consolidando el material con el mismo nivel de σ' , para así establecer la influencia del tiempo de consolidación en las magnitudes de estos. Por tanto, se realizaron dos mediciones adicionales a cada 24 horas, con lo cual se obtiene la variación de los módulos a lo largo del proceso de consolidación secundaria.

El procedimiento anterior se realizó a distintos niveles de esfuerzo efectivo o de consolidación, incluyendo etapas de carga y descarga de la curva de compresibilidad.

Palabras clave: Esfuerzo desviador, consolidación secundaria, rigidez dinámica, módulo dinámico equivalente de Young, módulo resiliente, pruebas triaxiales dinámicas.

Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible (arcillas)

JORDY IVÁN GARCÍA QUIRÓS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Octubre del 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO.....	1
RESUMEN EJECUTIVO.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES	5
METODOLOGÍA	18
RESULTADOS.....	30
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	63
CONCLUSIONES	68
RECOMENDACIONES.....	70
REFERENCIAS	71
APÉNDICES	73

Prefacio

Este proyecto de graduación fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el cual, desde su creación, ha contribuido al desarrollo y al bienestar de la sociedad mexicana a través de la constante investigación, generando importantes descubrimientos y avances en el área de la ingeniería.

Por lo tanto, el objetivo principal planteado para este proyecto de graduación fue determinar la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible. Para cumplir dicho objetivo, se realizaron mediciones del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo de resiliencia (M_r) en probetas de suelo provenientes del antiguo lago de Texcoco.

En la Ciudad de México, gran parte del agua potable durante décadas ha sido extraída mediante bombeo de los acuíferos presentes en el subsuelo de esa misma zona. De esta manera, tanto las obras hidráulicas realizadas como el bombeo han provocado una disminución considerable de los niveles piezométricos de los depósitos de suelos. Esto ha causado la consolidación de los mantos de arcillas, lo cual ha generado un incremento del esfuerzo efectivo y ha provocado el asentamiento regional característico de la Ciudad de México.

Por otro lado, como parte de la logística del proceso constructivo del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM), se hizo uso de técnicas de precarga (terraplén) que consistieron en consolidar los depósitos arcillosos (saturados) previamente a la construcción de las obras con una carga mayor a la que tendría finalmente. Una vez se logró el grado de consolidación objetivo, esta carga se retiró, y sobre el suelo mejorado se ejecutó la construcción de las diferentes obras.

En el Instituto de Ingeniería se observó que las propiedades de rigidez dinámica del suelo mejorado se vieron favorecidas por el efecto de la consolidación producto de la precarga colocada. Aunado a lo anterior, surgió el interés de evaluar

la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible.

La medición en laboratorio de los módulos E_{eq} y M_r se realiza según lo indicado en las normas ASTM D 3999 (1991) y AASTHO T 307 (2002), respectivamente. Estas mediciones generalmente se llevan a cabo una vez concluida la consolidación primaria. Debido al interés de evaluar el efecto causado por la consolidación secundaria en estos parámetros de rigidez, se realizaron dos mediciones adicionales, en un lapso de tiempo consecutivo de 24 horas, posterior a la disipación del exceso de presión de poro.

Primeramente, aprovecho para agradecer a Dios por permitirme concluir mi carrera universitaria.

Seguidamente, a mí familia, a todos en general y en especial a mi papá, mi mamá y mi hermana, puesto que siempre han demostrado su apoyo hacia mi persona.

Además, agradezco a mis amigos y a todas aquellas personas que he encontrado en mi paso por la universidad, quienes han contribuido a mi desarrollo académico y/o personal.

A mí profesora guía, Ing. Ivannia Solano Aguilar, ya que desde el inicio del proyecto mostró su interés en apoyarme, además de brindarme su guía durante el desarrollo del proyecto.

Por último, agradezco enormemente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto de Ingeniería por brindarme la oportunidad de desarrollar ahí mi proyecto de graduación, y en especial a la Dra. Alexandra Ossa López y al Dr. Mario Flores Guzmán por su guía y por los conocimientos compartidos conmigo.

Resumen ejecutivo

Según Díaz (2005) el estudio de la dinámica de suelos con el paso de los años ha surgido y evolucionado como una disciplina que ha permitido el desarrollo de modelos teóricos y experimentales para complementar los conocimientos del comportamiento del suelo. Permite describir, explicar y predecir su reacción bajo efectos de cargas dinámicas o cíclicas, además de comprender el comportamiento de las estructuras que sobre él se encuentren cimentadas. Esta disciplina nace a partir de otras, tales como la mecánica de suelos, la dinámica estructural, la dinámica del medio continuo y la ingeniería sísmica.

En las últimas décadas, las arcillas del antiguo lago de Texcoco han sido objeto de una amplia investigación. Para ello, se han aplicado pruebas tanto de laboratorio como de campo, con el objetivo de conocer cuál es el comportamiento (relación esfuerzo-deformación) ante la presencia de diferentes cargas tanto estáticas como dinámicas. Puesto que es una zona que a través de la historia ha presentado gran actividad sísmica que ha causado importantes afectaciones, gran parte de las investigaciones realizadas corresponden a pruebas que permiten comprender el comportamiento dinámico del suelo y sus características (Solís, 2017).

El módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_r) son parte de los parámetros dinámicos más representativos que se pueden obtener mediante pruebas de laboratorio.

Según Liu y Zhang (2014), el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) es de los parámetros más importantes utilizados para calcular y analizar la dinámica del suelo. También es esencial para realizar análisis de respuesta sísmica y diseño de cimentaciones.

Por otra parte, según AASHTO, la obtención del módulo resiliente (M_r) es de gran importancia puesto que permite predecir los esfuerzos recuperables (resilientes),

deformaciones y deflexiones en un pavimento, además se utiliza en el diseño de los espesores de la estructura de pavimentos.

Para la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de México (NAIM), producto de las extensas obras, era necesario realizar un adecuado diseño de las cimentaciones de este. Para ello, era requerido el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}). Por lo tanto, obtener parámetros que permitan realizar un exhaustivo análisis sísmico era necesario por dos razones esenciales; la primera, debido a la alta actividad sísmica característica de la zona y la segunda, por el nivel de importancia de la obra a construir. En el caso del módulo de resiliencia del suelo (M_r), para el proyecto NAIM era un valor necesario para llevar a cabo el diseño de la estructura de pavimento de las pistas de rodaje de dicho aeropuerto.

Este proyecto de graduación se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), específicamente en el Laboratorio de Vías Terrestre, y tuvo la finalidad de estudiar las propiedades dinámicas y resilientes del suelo bajo la influencia de la consolidación secundaria.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha prestado asesoría y acompañamiento al Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México encargados de la construcción del nuevo aeropuerto de México. Entre las funciones que ha realizado, se ha llevado a cabo la medición de dichos parámetros.

Como parte de la logística del proceso constructivo del NAIM, se hizo uso de técnicas de precarga (terraplén) que consistieron en consolidar los depósitos arcillosos (saturados) previamente a la construcción de las obras con una carga mayor a la que tendría finalmente. Una vez se logró el grado de consolidación objetivo, esta carga se retiró, y sobre el suelo mejorado se ejecutó la construcción de las diferentes obras.

En el Instituto de Ingeniería, se observó que las propiedades de rigidez dinámica del suelo mejorado se vieron favorecidas por el efecto de la consolidación producto de la precarga colocada. Es por ello que surgió el interés de evaluar la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible, puesto que, aunque previamente se conocía que el suelo mejoraba su rigidez dinámica, se ignoraba si este aumento era significativo o en cuanto porcentaje aumentaban los módulos.

Tras una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas acerca de la determinación del módulo de resiliencia (M_r) y módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) bajo el efecto de la consolidación secundaria de las arcillas en estudio, no se encontraron trabajos documentados.

Para llevar a cabo el objetivo principal, se planteó una serie de objetivos específicos, los cuales son:

- Estudiar conceptos teóricos del fenómeno de la consolidación de suelos, los ensayos triaxiales dinámicos y la relación de los módulos dinámico y resiliente con la rigidez dinámica de los suelos.
- Investigar las características geotécnicas de la zona del antiguo lago de Texcoco.
- Establecer los parámetros geotécnicos requeridos para la ejecución de los ensayos de consolidación a realizar en el laboratorio, para obtener los tiempos de consolidación que se utilizarán durante las pruebas triaxiales cíclicas.
- Ejecutar pruebas de laboratorio: consolidación y triaxiales cíclicas.
- Definir y analizar la relación entre los esfuerzos efectivos del suelo y los valores de los módulos dinámico y resiliente.

Para el desarrollo del proyecto, se trabajó con muestras inalteradas recuperadas en el antiguo lago de Texcoco; se utilizaron un total de cuatro muestras, las cuales fueron obtenidas mediante un tubo Shelby con la intención de conservar las propiedades del estado natural del suelo para provocar un cambio mínimo de sus condiciones en campo. Las profundidades a las cuales las muestras fueron recuperadas varían entre los 8,00 m y 10,00 m de profundidad.

Como parte del desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas a carga controlada, bajo condiciones consolidadas no drenadas (CU), aplicando ondas de tipo senoidal y

haversiana para la determinación del módulo E_{eq} y M_r , según indican las normas ASTM D 3999 (1991) y AASTHO T 307 (2002), respectivamente

Las pruebas consistieron en dos etapas. Primero, las probetas se sometieron a un esfuerzo efectivo (σ') definido; una vez concluida la consolidación primaria, se realizaron mediciones de ambos módulos dinámicos a distintos niveles de esfuerzo desviador. Una vez determinados dichos módulos, se continuó consolidando el material con el mismo nivel de σ' , para así establecer la influencia de los módulos E_{eq} y M_r con el tiempo. Por tanto, se realizaron dos mediciones adicionales cada 24 horas. De esta forma, se obtuvo la variación de los módulos a lo largo del proceso de consolidación secundaria.

El procedimiento anterior se realizó a distintos niveles de esfuerzo efectivo o de consolidación, incluyendo etapas de carga y descarga de la curva de compresibilidad propia de cada muestra ensayada. Respecto a los resultados obtenidos, se puede mencionar que la influencia causada por la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco se manifiesta como un aumento en la magnitud de los módulos E_{eq} y M_r . Se puede apreciar que existe un incremento notorio de los módulos debido a la consolidación secundaria; en especial a niveles altos de esfuerzo efectivo medio aplicado. Los valores de los módulos obtenidos se encuentran en un rango de 5 MPa hasta los 70 MPa, tanto para E_{eq} como para M_r ; esto al considerar los resultados obtenidos para las 4 muestras ensayadas.

Se realizó una comparación en términos de porcentajes entre los módulos obtenidos para la consolidación primaria y la consolidación secundaria, de manera que, en los valores obtenidos para las 4 muestras ensayadas, se registran incrementos de hasta 18 % y 19 % para E_{eq} y M_r .

De manera general, con base en los resultados obtenidos, se evidenció que el valor de los módulos (E_{eq} y M_r) depende de diversos factores, tales como el esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) de la muestra de suelo, el esfuerzo efectivo de consolidación aplicado (σ'), la relación de vacíos (e), los esfuerzos desviadores aplicados (σ'_d), la deformación unitaria (ϵ), los límites de consistencia y, en este caso, el grado de consolidación del suelo (medición de módulo en consolidación primaria o secundaria).

Introducción

Este proyecto de graduación se desarrolló en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), específicamente en el Laboratorio de Vías Terrestres, donde se realizan pruebas que permiten estudiar la calidad de los materiales para carreteras, como los suelos, asfaltos, mezclas asfálticas, entre otros. Se enfoca principalmente en el análisis estructural y el diseño de pavimentos.

En este sentido, el desarrollo de este proyecto de graduación, titulado "*Influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible (arcillas)*", tuvo la finalidad de estudiar las propiedades dinámicas y resilientes del suelo bajo la influencia de la consolidación secundaria.

Cuando se conoce que se pueden presentar deformaciones de gran magnitud, producto de sollicitaciones dinámicas importantes, lo más recomendable es realizar un estudio que permita comprender el comportamiento esfuerzo-deformación-tiempo de los depósitos de suelo que pongan en riesgo la estabilidad de las estructuras, debido a que la presencia de cargas dinámicas produce una reducción de la resistencia al esfuerzo cortante y un aumento de la compresibilidad.

En las últimas décadas, las arcillas del antiguo lago de Texcoco han sido objeto de una amplia investigación. Se han aplicado pruebas tanto de laboratorio como de campo, con el objetivo de conocer cuál es el comportamiento (relación esfuerzo-deformación) ante la presencia de diferentes cargas tanto estáticas como dinámicas. Puesto que es una zona que a través de la historia ha presentado mucha actividad sísmica que ha causado grandes afectaciones, gran parte de las investigaciones realizadas corresponden a pruebas que permiten comprender el comportamiento dinámico del suelo y sus características (Solís, 2017).

En el trabajo desarrollado por Córdoba (1986), se muestran resultados de las primeras pruebas triaxiales dinámicas de

laboratorio de tipo consolidada-no drenada en arcillas del antiguo lago de Texcoco, en donde se utilizaron diferentes magnitudes de carga cíclica con el objetivo de evaluar el comportamiento de las muestras ante el efecto de la presencia de estas cargas.

El módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_r) son parte de los parámetros dinámicos más representativos que se pueden obtener para ser utilizadas en la predicción del comportamiento de una masa de suelo en el caso del módulo E_{eq} , o para su utilización como parte del diseño de los espesores de las capas de pavimento en el caso de M_r . Estos parámetros pueden ser obtenidos mediante pruebas de laboratorio, con las cuales se tiene la ventaja que se pueden manipular las condiciones de los ensayos, tales como los tiempos de consolidación, los esfuerzos de confinamiento aplicados y los esfuerzos desviadores, según el tipo de prueba que se desee realizar.

Recientemente, Romero (2018) desarrolló en el Instituto de Ingeniería una investigación en la que se realizó una comparación entre el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_r). Se utilizaron muestras de suelos provenientes del antiguo lago de Texcoco, y se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas y resilientes consolidadas-no drenadas (CU), utilizando diferentes niveles de esfuerzo desviador y esfuerzo efectivo, con lo cual se logró evidenciar que efectivamente existe una relación lineal entre ambos módulos. Para fines prácticos, se podrán considerar como iguales y se podrá determinar uno u otro, por medio de pruebas triaxiales cíclicas o de módulo resiliente.

En este proyecto de graduación también se planteó la realización de pruebas triaxiales dinámicas consolidadas-no drenadas (CU) en arcillas del antiguo lago de Texcoco, utilizando diferentes niveles de esfuerzo desviador y esfuerzo efectivo.

La variación más importante que se presenta respecto a la investigación realizada

por Romero (2018) es que, para la etapa de consolidación de las probetas de suelo, se permitió que para cada nivel de esfuerzo efectivo aplicado se alcanzara la consolidación secundaria; esto con el objetivo de realizar mediciones de los módulos E_{eq} y M_r antes y después de la disipación del exceso de presión de poro. De esta manera, se pudo medir en laboratorio cuál es la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas.

Se trabajó con muestras inalteradas recuperadas en el antiguo lago de Texcoco; se utilizaron un total de cuatro muestras, las cuales fueron obtenidas mediante un tubo Shelby con la intención de conservar las propiedades del estado natural del suelo para provocar el mínimo cambio de sus condiciones en campo. Las profundidades de las cuales las muestras fueron recuperadas varían entre los 8,00 m y 10,00 m de profundidad.

Como parte del desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo pruebas triaxiales cíclicas a carga controlada, bajo condiciones consolidadas no drenadas (CU), aplicando ondas de tipo senoidal y haversiana para la determinación del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo resiliente (M_r), respectivamente.

Durante el desarrollo del proyecto, las probetas de suelo fueron sometidas, cada una, a un total de ocho o nueve incrementos de esfuerzo efectivo. Para cada incremento, fueron evaluados los módulos (E_{eq} y M_r) en diferentes etapas del proceso de consolidación (primaria y secundaria), lo que permite obtener la variación en los módulos (E_{eq} y M_r) a causa de la consolidación secundaria.

Por lo mencionado anteriormente, como objetivo general para este proyecto de graduación se planteó determinar la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible. Para llevarlo a cabo, se planteó una serie de objetivos específicos que permitieran seguir una línea de investigación adecuada para llevar a cabo su desarrollo, los cuales son:

- Estudiar conceptos teóricos del fenómeno de la consolidación de suelos, los ensayos triaxiales dinámicos y la relación de los módulos dinámico y resiliente con la rigidez dinámica de los suelos.

- Investigar las características geotécnicas de la zona del antiguo lago de Texcoco.
- Establecer los parámetros geotécnicos requeridos para la ejecución de los ensayos de consolidación a realizar en el laboratorio, para obtener los tiempos de consolidación que se utilizarán durante las pruebas triaxiales cíclicas.
- Ejecutar pruebas de laboratorio: consolidación y triaxiales cíclicas.
- Definir y analizar la relación entre los esfuerzos efectivos del suelo y los valores de los módulos dinámico y resiliente.

Fundamentos teóricos y antecedentes

Características geotécnicas de la zona de estudio

Localización

El antiguo lago de Texcoco se encuentra ubicado como se representa en la Figura 1, al noreste de la cuenca del Valle de México, a 2225 msnm, ocupando la zona más baja de dicha cuenca. Sus límites al norte son Tepetlaoxtoc, Chiconcuac y Papalotla; al oeste, Atenco y Nezahualcóyotl; al sur, Chimalhuacán e Ixtapaluca; y al este, Tlaxcala y Puebla.

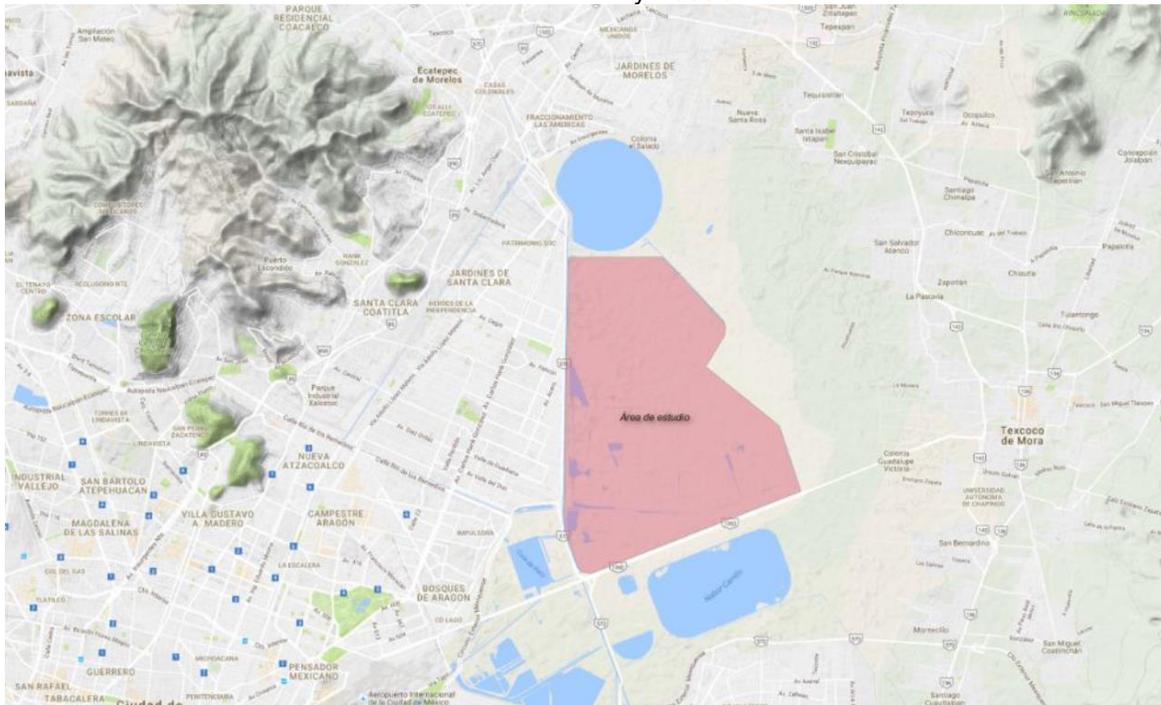


Figura 1. Localización del antiguo lago de Texcoco.
Fuente: Solís (2017)

Geología

Según Santoyo, Ovando, Mooser y León (2005), el lago de Texcoco y otros lagos de la cuenca del Valle de México se formaron por el recinto de una depresión debido a la formación de montañas volcánicas. Como se

puede apreciar en la Figura 2, el Valle de México limita al norte con las sierras de Pachuca, Tepetzotlán, Guadalupe, Patlachique y Tepozán, formadas a fines del Mioceno. Seguidamente, durante el Plioceno Inferior se crearon las elevadas Sierras al Este y al Oeste, la de Las Cruces y Nevada.

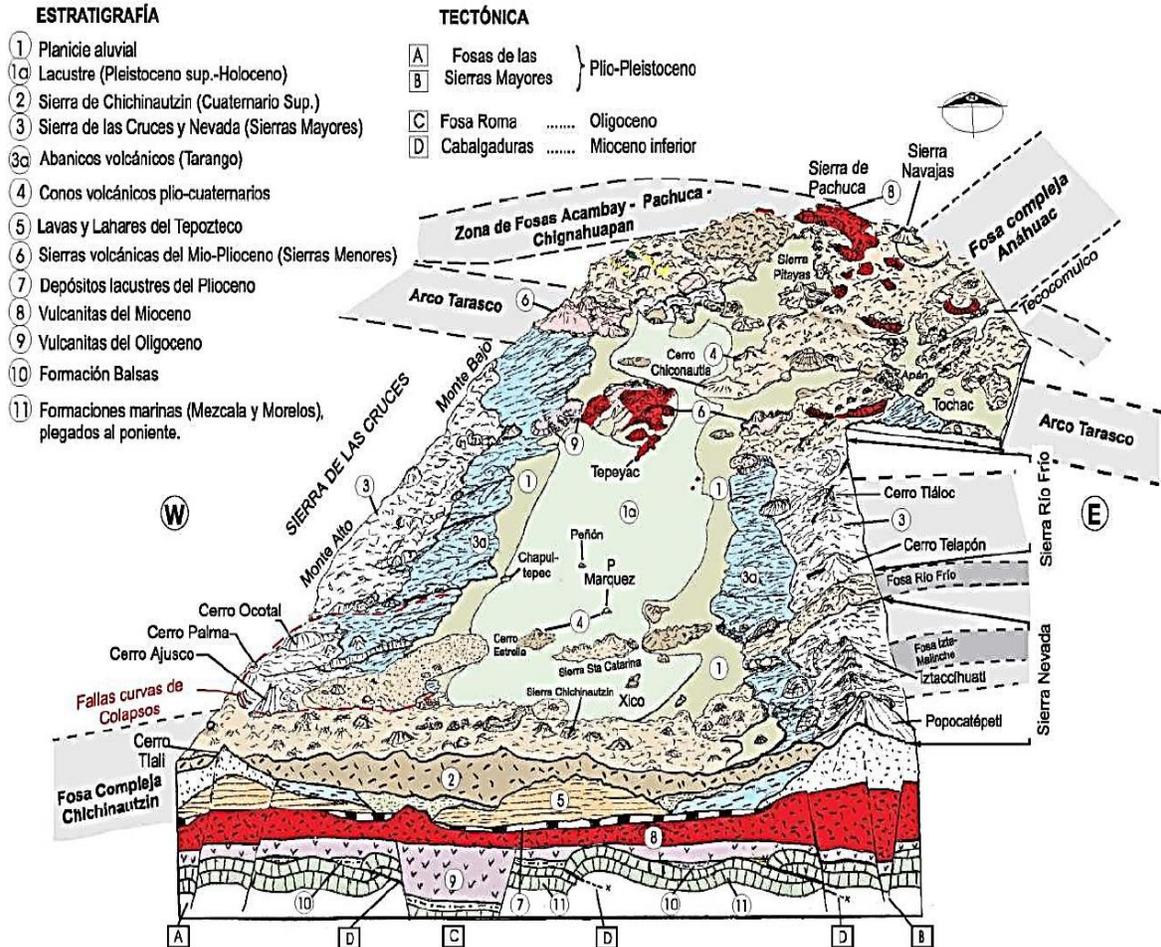


Figura 2. Geología y morfología de la cuenca del Valle de México.
Fuente: Santoyo *et al.* (2005)

Uno de los primeros productos de vulcanismo a finales de Plioceno fue el Cerro del Ajusto y, posteriormente, en el Cuaternario, dio acceso a grandes efusiones de basalto que construyeron la Sierra de Chichinautzin; ambas formaciones están ubicadas al Sur de la cuenca del Valle de México.

Los eventos desarrollados durante el periodo del cuaternario, entre el Popocatepetl y la Sierra de Zempoala, llevaron a una transformación del Valle de México, cerrando el drenaje hacia el sur y provocando así la creación de una cuenca cerrada (Marsal, 1975). En consecuencia, el agua llegó a ser almacenada en varios lagos y los ríos que descendían de las sierras que se encuentran alrededor hicieron que se depositara material de origen aluvial, arrastrados y depositados por corrientes de agua.

Al mismo tiempo, los lagos que se encontraban en las zonas más bajas se

empezaron a llenar de material de tipo limo-arenoso en conjunto con emisiones de cenizas y pómez, las cuales llegaron hasta esa zona por corrientes de aire o agua, cuyo origen eran los volcanes ubicados en la zona sur del valle. Finalmente, en la época glacial de los últimos cien mil años, la masa de agua se llegó a extender hasta formar un solo lago, según Santoyo *et al.* (2005).

La desecación del antiguo lago hasta convertirse en la zona desértica actual es, en gran parte, producto del drenado al que la cuenca se ha visto sometida, con el objetivo de urbanizar la zona y buscar el abastecimiento de agua potable. Debido al drenaje provocado por el ser humano y a la topografía del lugar, el lago original se transformó en lagos más pequeños que con el paso de los años fueron variando su extensión, de acuerdo con Jaime, Reséndiz, y Romo (1989). La cuenca de México está

dividida en varias subcuencas, entre ellas, las de Teotihuacán, Texcoco, Ciudad de México y Chalco. La subcuenca de Texcoco se sitúa en la porción nororiental de la mitad sur de la cuenca de México y corresponde a una planicie cubierta por arcillas lacustres de espesores variables, los que cubren a materiales aluviales.

Los materiales encontrados en la subcuenca de Texcoco son producto de que el antiguo lago se formó en las partes más bajas de dicha cuenca. Se convirtió en un vaso de evaporación y, por ende, en un lago salobre. Esto ocurrió debido a que la presencia de aguas lodosas no permitió que se desarrollaran turbas y, por lo contrario, se depositaron ahí arcillas floculadas ricas en agua.

Estratigrafía

Estudios recientes llevados a cabo por II-UNAM (2016) han permitido definir el perfil estratigráfico de la zona del antiguo lago de Texcoco como se muestra a continuación

- Costra o manto superficial: compuesta por un estrato de suelo tipo arcillo limoso, relativamente firme a causa del secado solar, presenta un espesor variable entre los 0,20 m y 4,00 m.
- Suelos arcillosos blandos: ubicado debajo de la costra superficial se

encuentra una arcilla con alta plasticidad y de origen lacustre. Su resistencia es variable, así como su espesor a lo largo de la zona, el cual puede encontrarse en un rango entre los 5,00 y los 30,00 m. Las probetas de suelos utilizadas en este proyecto de graduación fueron recuperadas de esta capa.

- Suelos arenosos y limosos: bajo las arcillas blandas se tiene la presencia de una secuencia de estratos que se alternan entre suelos arenosos, limos y pequeñas formaciones de arcilla, con resistencias y características variables, así como sus espesores, los cuales se encuentran entre 8,00 m y 12,00 m. Además, hay presencia de delgadas capas de suelos duros.
- Suelos arcillosos de compresibilidad media: ubicadas debajo de los suelos arenosos y limos, presentan una compresibilidad media con espesores entre los 4,00 m y los 12,00 m.
- Suelos profundos: se encuentran subyacentes a los suelos arcillosos de compresibilidad media. Son suelos que presentan una mayor resistencia y son mayormente de tipo granular.

Para una mejor comprensión del perfil estratigráfico de la zona, se presenta la Figura 3.



Figura 3. Perfil estratigráfico
Fuente: Zárate (2016).

Propiedades de las arcillas del Valle de México

Las arcillas del Valle de México han sido estudiadas por diferentes autores. Según Paredes (1987), durante estudios previos se logró concluir que, en muestras separadas a tan solo 5,00 a 10,00 cm de profundidad, la variación en sus características (relaciones volumétricas y propiedades índices) es extrema.

Por otra parte, Zeevaert (1953) indica que el agua del antiguo lago de Texcoco presentaba un alto contenido de sales, por lo que se concluye que las arcillas fueron formadas en un medio salino. El contenido salino del agua intersticial disminuye con la profundidad hasta llegar a convertirse en agua dulce.

De acuerdo con Paredes (1987), uno de los indicadores más importantes de las arcillas del Valle de México es el contenido de agua sumamente alto, entre 200 % y 45 %. En el caso del límite líquido y plástico, los valores varían entre 100 % y 300 %, y 40 % y 120 %, respectivamente.

Además, estas arcillas se encuentran entre las más permeables, debido a la relación de vacíos que presentan: son valores muy altos, en el rango de 6 a 12. Al presentar una relación de vacíos tan alta, otra característica es la alta compresibilidad y la baja resistencia al esfuerzo cortante.

Influencia de las cargas dinámicas sobre las arcillas

Para realizar una correcta predicción de la respuesta del suelo, se requiere conocimiento de sus propiedades y, además, tener en cuenta que estos parámetros no son constantes, sino que dependen directamente de las sollicitaciones y las características del suelo.

Cuando una masa de suelo es sometida al efecto de cargas dinámicas o cíclicas, ya sea por el tránsito de vehículos, la vibración de maquinarias o por el efecto de

sismos, internamente ocurre un cambio en los esfuerzos a los que dicha masa estaba sometida anteriormente (Díaz, 2005).

El efecto que la aplicación de cargas dinámicas causa sobre el suelo no necesariamente provoca la falla, pero si puede llegar a provocar deformaciones que posteriormente causen afectaciones a las estructuras subyacentes.

Para ejecutar un análisis dinámico del suelo, es necesario contemplar aspectos como las deformaciones en la masa de suelo producto del efecto de las cargas cíclicas, los efectos producidos sobre las propiedades de esfuerzo cortante y de resistencia a la compresión, así como la determinación de los parámetros de rigidez dinámica, tales como el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) y la relación de amortiguamiento (λ). Por su parte, en la ingeniería de pavimentos, el parámetro dinámico a estudiar es el módulo de resiliencia del suelo (M_r).

Al considerar la presencia de un sismo, por ejemplo, para el diseño de la cimentación de una maquinaria o para la determinación de la respuesta dinámica de un depósito de suelo, es necesario la determinación de los parámetros dinámicos que gobiernan al suelo y también por otra parte, se debe tomar en cuenta que, los niveles de deformación generados en el suelo se encuentran en rangos diferentes.

Pruebas de laboratorio y de campo

Existen diferentes pruebas tanto de campo como de laboratorio que permiten determinar las propiedades dinámicas del suelo para diferentes rangos de deformación. La importancia de que existan pruebas que para obtener estos parámetros para diferentes rangos de deformación radica en el hecho de que cada situación analizada tiene sollicitaciones en las que la carga dinámica aplicada será diferente tanto en frecuencia como en magnitud. Tal es el caso de un sismo, en los que el nivel de deformación alcanzado puede ser hasta del 10 %, mientras que la sensibilidad de equipos como un microscopio no admite deformaciones en las cimentaciones mayores a 10^{-4} %.

De forma general, las pruebas de laboratorio son más económicas que las pruebas de campo y son más sencillas de ejecutar, puesto que se pueden modificar las variables y las condiciones de frontera bajo las cuales se desee realizar el análisis de las muestras. Su desventaja radica en la alteración que sufren las muestras en el proceso de extracción, traslado, almacenamiento y preparación para el ensayo.

Según Díaz (2005), una ventaja de las pruebas de campo es que, al momento de su ejecución, se utiliza un mayor volumen de suelo y las pruebas en general permiten una menor alteración. Las desventajas consisten en que, en estos casos, el control de las condiciones frontera se vuelve complejo y,

generalmente, el rango de deformaciones que se pueden alcanzar son bajos.

Puesto que el comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas es diferente al obtenido bajo cargas estáticas, se han desarrollado diferentes tipos de ensayos para la obtención de los parámetros dinámicos, con el fin de conocer cómo se comportará el suelo cuando se encuentre bajo las sollicitaciones propias (desde el punto de vista dinámico) de la obra de ingeniería a la que será sometido.

Para cada fenómeno que se requiera estudiar, deberá realizarse un análisis de las diferentes variables que permita la escogencia del método o ensayo más apropiado. Algunos ensayos y sus respectivos rangos de deformación se pueden apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de ensayos de campo y de laboratorio y sus respectivos rangos de deformación para la determinación de los parámetros dinámicos.

Tipo de ensayo	Rango de deformación angular γ (%)
Tirialxial cíclico (L)	10^{-2} - 5
Corte simple Cíclico (L)	10^{-2} - 5
Torsión Cíclica (L)	10^{-2} - 5
Columna resonante (L)	10^{-4} - 10^{-2}
Cristales piezolétricos (L)	10^{-6} - 10^{-5}
Refracción sísmica (C)	10^{-4} - 10^{-3}
Cross-hole, Down hole Up hole (C)	10^{-4} - 10^{-3}
Vibración forzada en bloques o placas (C)	10^{-3} - 10^{-1}
Ensayo de placa cíclico (C)	10^{-2} - 5
Vibración forzada en placa atornillada (C)	10^{-3} - 10^{-1}
(C) = Campo	
(L) = Laboratorio	

Fuente: Díaz (2005).

Parámetros dinámicos

El comportamiento de todo un depósito de suelo que se encuentra bajo los efectos de cargas dinámicas es regido por las propiedades de esa zona en específico, las cuales, a su vez, dependen de los esfuerzos que hayan existido antes y después de la aplicación de estas cargas (Enríquez, 2009). Por la aplicación de estas cargas, en el suelo se generarán deformaciones angulares, las cuales pueden ser bajas o altas. En el caso de ser bajas ($\gamma < 10^{-4} \%$), los valores del módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) y la relación de amortiguamiento no presentan mayores cambios; se mantienen prácticamente constantes. Por otro lado, para niveles de deformación altos ($\gamma > 10^{-1} \%$) (como los provocados por un sismo generalmente), hacen que el módulo de rigidez al esfuerzo cortante experimente una degradación y se incremente la relación de amortiguamiento

conforme aumente el valor de la deformación angular (γ).

Las muestras de suelo sometidas a cargas cíclicas sufren dos tipos de deformaciones: una que responde a la repetitividad de la carga aplicada y es recuperable en cada uno de los ciclos, y otra que es permanente y se acumula después de cada uno de los ciclos de esfuerzos aplicados.

Ambos tipos de deformaciones se utilizan para realizar diferentes tipos de análisis. En el caso de la deformación recuperable, se puede emplear para obtener parámetros dinámicos como el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G), el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), la relación de amortiguamiento (λ) y el módulo de resiliencia (M_r). Por otra parte, la deformación permanente permite calcular asentamientos en estructuras cimentadas sobre ese suelo.

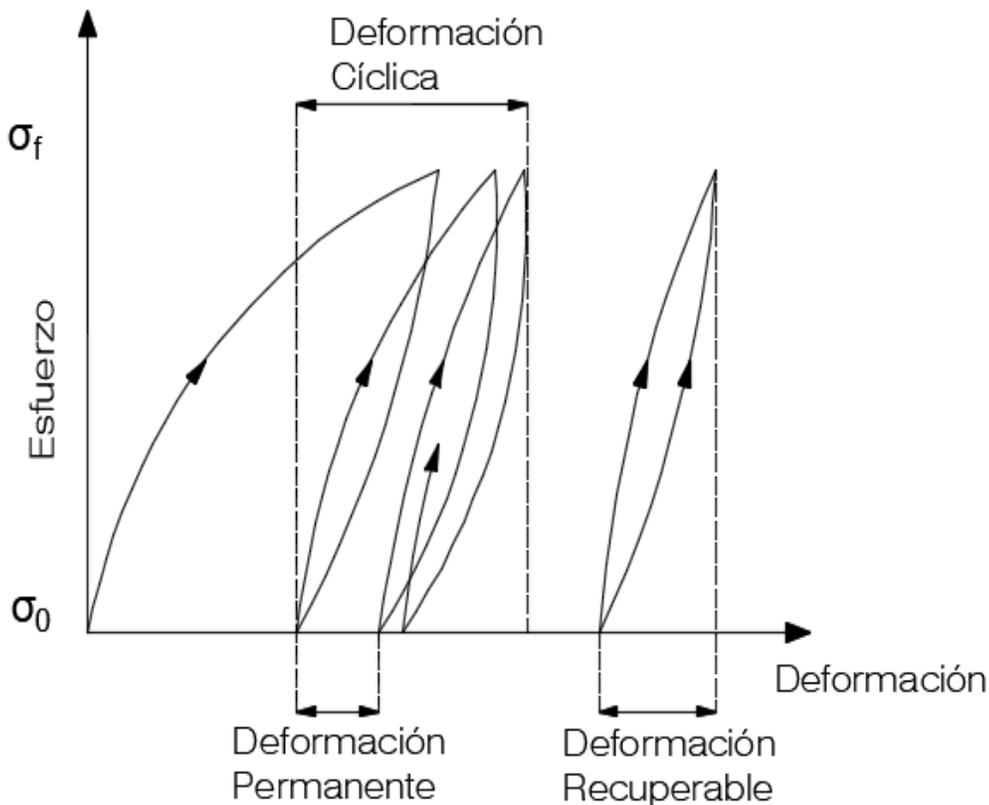


Figura 4. Deformaciones generadas por el efecto de cargas cíclicas.
Fuente: Instituto Mexicano del Transporte (2014).

En la Figura 4, se pueden apreciar las deformaciones generadas por la aplicación de cargas cíclicas controladas en un ensayo unidireccional, variando así sus esfuerzos desde un estado inicial (σ_0) hasta uno final (σ_f).

En el caso de la deformación plástica, se podrían presentar dos situaciones. En el primer caso, cuando el esfuerzo aplicado no sobrepasa el nivel máximo de falla luego de la aplicación de cierto número de ciclos, el suelo dejará de experimentar una deformación plástica y alcanzará un estado elástico. En el otro caso, la deformación plástica más bien aumentará hasta que el suelo alcance la falla dinámica.

En el desarrollo de este proyecto de graduación, no se realizó ningún análisis dinámico ni ningún tipo de diseño como tal, puesto que no eran parte del alcance del proyecto; sin embargo, se consideró de suma importancia para un mayor entendimiento de las características dinámicas del suelo dar a conocer los parámetros más representativos.

Módulo de rigidez al esfuerzo cortante

De acuerdo con Enríquez (2009), el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) se define como la recta secante determinada por los puntos extremos de la curva de histéresis, donde el ciclo completo de carga y descarga es idealizado, como un lazo de histéresis cerrado, tal y como se muestra en la Figura 5. Este parámetro representa la relación existente entre un esfuerzo cortante y la deformación angular producto de ese esfuerzo. Además de su obtención mediante pruebas de laboratorio, es posible estimarlo indirectamente por medio de la siguiente expresión:

$$G = \frac{E_{eq}}{2(1+\mu)} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

E_{eq} : módulo dinámico equivalente de Young.

μ : relación de Poisson.

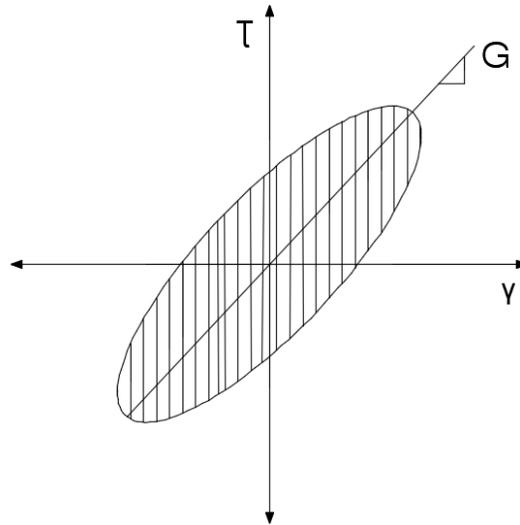


Figura 5. Curva típica esfuerzo-deformación de un ensayo triaxial cíclico.
Fuente: Enríquez (2009).

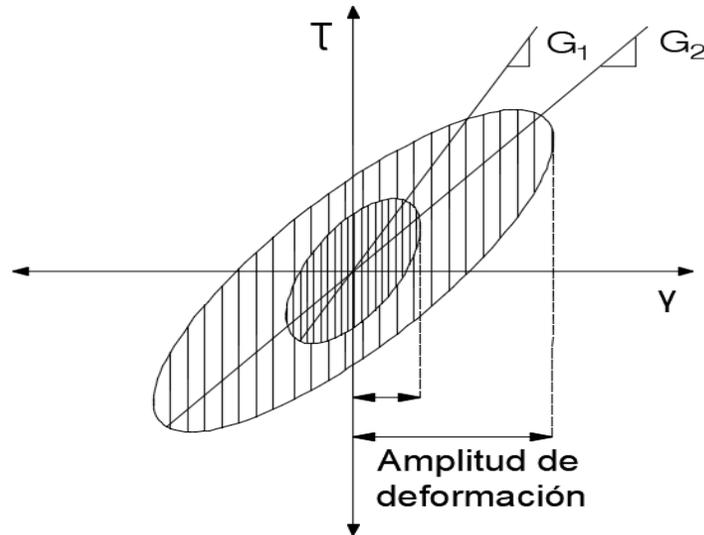


Figura 6. Relación histerética esfuerzo-deformación para diferentes amplitudes de deformación
Fuente: Enríquez (2009).

Las Figura 5 y Figura 6 presentan la variación del módulo de rigidez con respecto al esfuerzo cortante y a la deformación angular. Se puede apreciar que el comportamiento del módulo tiende a decrecer conforme se aumenta el nivel de deformación angular.

Según Enríquez (2009), en el caso de suelos cohesivos, como son los suelos del antiguo lago de Texcoco, para deformaciones angulares pequeñas ($\gamma < 10^{-4} \%$), el valor del módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G) depende de características propias del suelo, tales como el índice de plasticidad (I_p), la relación de vacíos (e), el historial de consolidación y los efectos de la consolidación secundaria.

De acuerdo con la ecuación 1, generalmente solo se obtiene uno de los módulos, ya sea el módulo de rigidez al esfuerzo cortante o el módulo dinámico equivalente de Young, ya que dicha ecuación permite relacionarlos.

Relación de amortiguamiento

Cuando un depósito de suelo es sometido al efecto de cargas dinámicas, por sus características de rigidez, el suelo presenta la capacidad tanto de almacenar como disipar la energía potencial producto de las cargas cíclicas. Lo anterior conlleva la generación de ciclos histeréticos. La relación entre la

cantidad de energía que es almacenada por el suelo y la energía disipada por este es llamada "relación de amortiguamiento" (λ). Esta relación, mediante pruebas de laboratorio, puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{\text{Área del ciclo de histéresis}}{4\pi * \text{Área AOB}} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde el área del ciclo de histéresis corresponde al área de la energía disipada para un ciclo de carga y el área AOB corresponde al área de la energía almacenada o potencial para un ciclo de carga, la cual, en este caso, corresponde el área del triángulo que tiene como límite la recta que define el módulo de rigidez al esfuerzo cortante, como se aprecia en la Figura 7.

El área correspondiente al área del lazo o ciclo de histéresis representa la cantidad de energía que es disipada por unidad de volumen de una muestra de suelo, por cada ciclo de carga.

Por otra parte, el área correspondiente al triángulo AOB representa la cantidad de energía potencial de deformación almacenada, para ese mismo ciclo de carga.

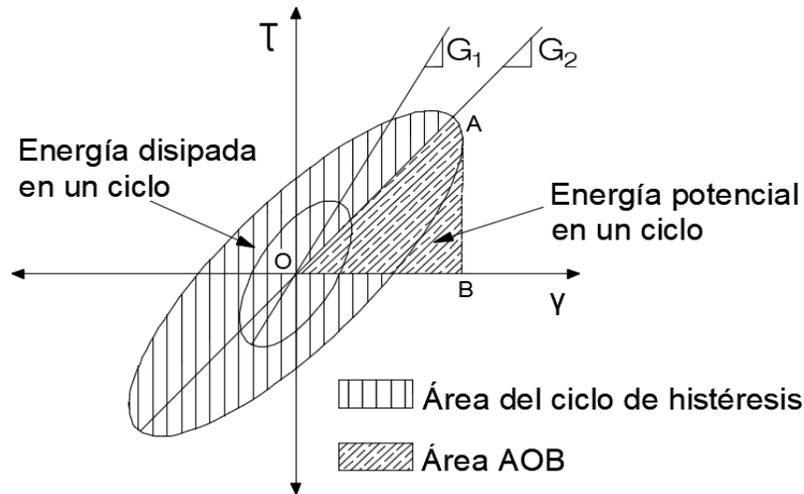


Figura 7. Ciclo de histéresis de un ensayo cíclico y determinación del coeficiente de amortiguamiento.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte (2014).

La relación de amortiguamiento permite obtener una medida de las capacidades de un suelo para lograr disipar una cantidad de energía. Esto es generado como consecuencia de las fricciones a las que se ven sometidas las partículas de suelo al momento de recibir las cargas cíclicas.

La energía de deformación liberada durante el proceso de descarga es menor que la energía almacenada durante el proceso de carga. Por lo tanto, el deslizamiento de partículas individuales en una masa de suelo afecta la cantidad de energía absorbida; cuando se aumenta la deformación del suelo sin que llegue a la falla, también se aumenta el amortiguamiento de este (Solís, 2017).

Relación de Poisson

El valor de la relación de Poisson de las arcillas del antiguo lago de Texcoco, tomando en cuenta que en este caso se encuentran saturadas, corresponde a $\mu = 0,50$ (Paredes, 1987).

Módulo dinámico equivalente de Young

Según el Instituto Mexicano del Transporte (2014), el valor del módulo dinámico

equivalente de Young, E_{eq} , corresponde al valor de la pendiente que conecta los puntos extremos que unen el lazo de histéresis de muestras que han sido sometidas a cargas cíclicas.

Este valor permite obtener la relación entre la deformación unitaria axial (ϵ) y el esfuerzo desviador (σ_d) necesario para ocasionar ese nivel de deformación.

Según Liu y Zhang (2014), el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) es uno de los parámetros más importantes para calcular y analizar la dinámica del suelo. También es esencial para realizar análisis de respuesta sísmica y diseño de cimentaciones.

Si durante la realización de las pruebas dinámicas se obtiene el valor de E_{eq} para diferentes esfuerzos desviadores, se podrá observar el efecto causado sobre una muestra de suelo por parte de las cargas cíclicas, puesto que, como se observa en la Figura 8, al aumentar el valor del esfuerzo, se generan mayores deformaciones al suelo y esto conlleva una degradación en el valor de E_{eq} .

La carga cíclica que se aplica para la medición de E_{eq} durante las pruebas triaxiales dinámicas es mediante una onda periódica senoidal, la cual simula la forma de los esfuerzos inducidos por un sismo (Seed y Chan, 1966). La forma de esta onda se puede observar en la Figura 9.

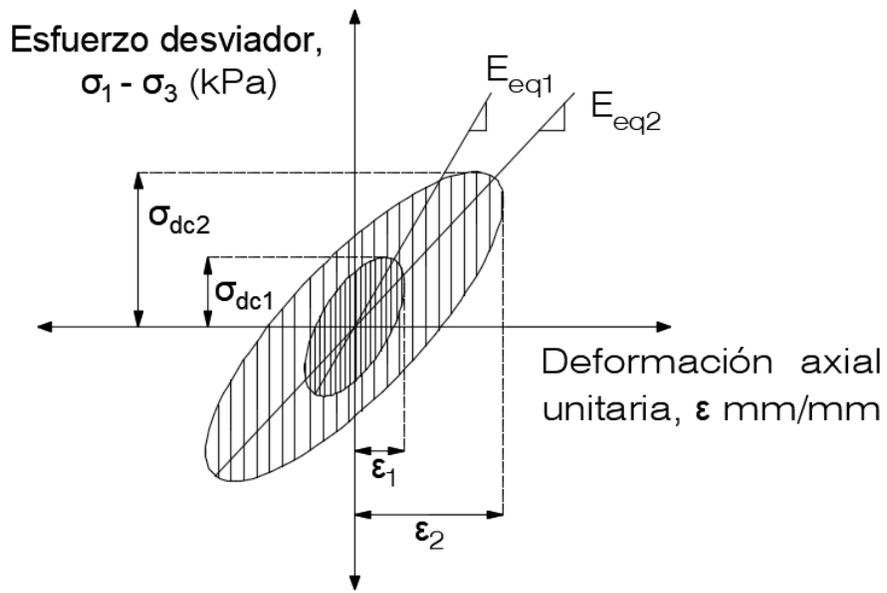


Figura 8. Efecto de la aplicación de diferentes esfuerzos desviadores en la deformación axial.
Fuente: Instituto Mexicano del Transporte (2001).

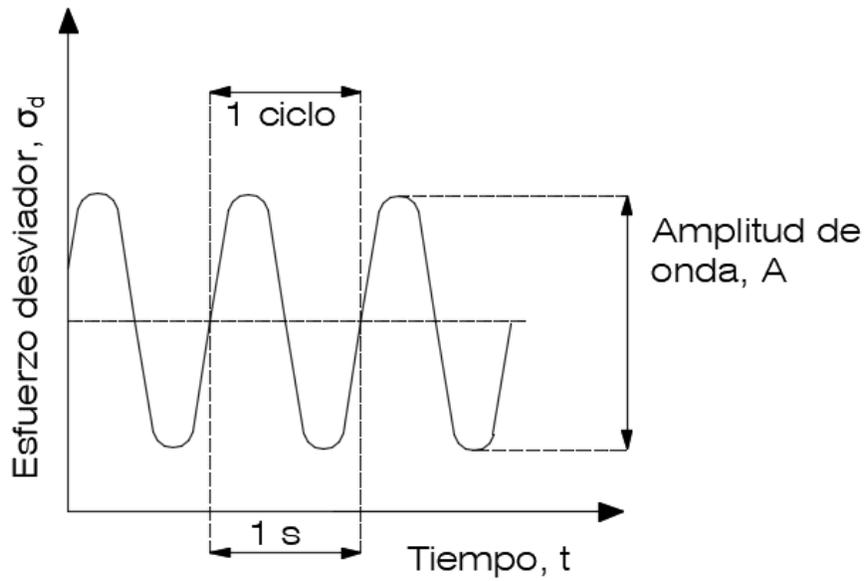


Figura 9. Esfuerzo desviador vs tiempo, correspondiente a un pulso senoidal.
Fuente: modificado de Romero (2018).

Propiedades resilientes del suelo

En diferentes metodologías, el valor del módulo de resiliencia es indispensable para llevar a cabo un diseño correcto del pavimento, sea el pavimento rígido o flexible. En esto radica la necesidad de hacer una correcta estimación del módulo de resiliencia, tomando en cuenta para ello los factores que afectarán al suelo al momento de someterlo al efecto de las cargas (en este caso, sobre todo vehiculares) y sus condiciones y características propias.

El tránsito vehicular transmite al suelo cargas dinámicas de magnitudes variadas que afectan directamente la estructura de pavimentos, incluyendo el terreno donde se

encuentran cimentados. La transmisión de estos esfuerzos a través de la estructura de pavimentos es muy compleja, debido al movimiento que el tránsito vehicular realiza.

En la Figura 10, se muestra una vista longitudinal de las capas de una estructura de pavimento, así como una carga que sigue un movimiento con una velocidad que puede ser constante o variable. Cuando la carga se encuentra aplicada en las posiciones A y C, se observa que se generan esfuerzos normales y cortantes sobre el terreno (en el punto P). Sin embargo, en el caso en el que la carga se aplique en la posición B, no se generan esfuerzos cortantes en el punto P, sino únicamente esfuerzos normales, proporcionando así una condición triaxial por parte de los esfuerzos recibidos.

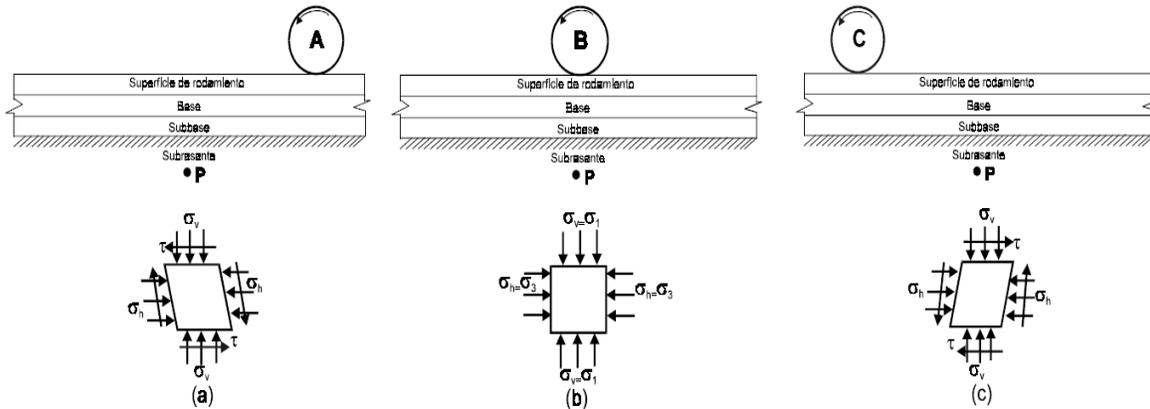


Figura 10. Estado de esfuerzos en la subrasante. Fuente: Instituto Mexicano del Transporte (2001).

Para el caso de las pruebas de laboratorio, es la condición B de la Figura 10 la que se simula en los ensayos que se realizan. Se aplica un esfuerzo de confinamiento y se varían los esfuerzos desviadores aplicados bajo cada una de las condiciones de confinamiento establecidas.

De acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte (2001), la carga transmitida por los vehículos a la estructura de pavimentos tiene forma de pulsos. El valor de la magnitud de dichos pulsos se encuentra ligado a factores como la presión de inflado de las llantas, la carga por eje, la velocidad de aplicación, así como el nivel de tránsito diario. La máxima deformación que la estructura de

pavimentos registra está ligada al valor del esfuerzo máximo aplicado.

En las consideraciones realizadas para llevar a cabo el diseño de pavimentos, se contemplan dos tipos de deformaciones: las plásticas y las resilientes. Las deformaciones de tipo resiliente se encuentran en el rango elástico-lineal y, por lo tanto, cuando la fuerza deformadora se encuentra actuando sobre el suelo, este tiende a recuperarse de manera inmediata. En el caso de las deformaciones plásticas, se encuentran en el rango plástico, lo cual tiene como consecuencia que cuando la fuerza deformadora deja de actuar, estas deformaciones se vuelven permanentes.

Módulo resiliente

Como se muestra en la Figura 11 bajo el efecto de cargas dinámicas cíclicas, las deformaciones plásticas tienden a acumularse y disminuir ante las aplicaciones de cada uno de los ciclos de carga, de modo que el suelo llega a un estado en el que deja de deformarse permanentemente y las siguientes deformaciones obtenidas son elásticas o recuperables. Esto le proporciona al suelo características resilientes.

Según AASTHO T 307 (2002), la obtención del módulo resiliente (M_r) es de gran importancia, dado que permite predecir los esfuerzos recuperables (resilientes), las deformaciones y las deflexiones en un pavimento. Asimismo, se utiliza en el diseño de los espesores de la estructura de pavimentos.

El módulo resiliente se define como la magnitud del esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión axial dividido entre el valor de la deformación axial recuperable. Por lo tanto, se tiene los siguiente:

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial\ recuperable}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- σ_3 = Esfuerzo principal menor
- σ_1 = Esfuerzo principal mayor
- σ_d = Esfuerzo desviador

ϵ = Deformación axial recuperable

Durante las pruebas en laboratorio, según AASTHO T 307 (2002), para la determinación del módulo resiliente, las muestras de suelo son sometidas bajo el efecto de carga axial cíclica, hasta que se obtiene un comportamiento elástico.

Cuando se tiene esta respuesta por parte del suelo, el valor del módulo resiliente deja de ser variable y se empieza a acercar más a un valor constante. Este valor es conocido como "módulo de resiliencia".

Respecto a la determinación del módulo resiliente, como se muestra en la Figura 12, el tipo de onda con la que se induce la carga cíclica haversiano, la cual consta de un periodo de aplicación de 0,1 s y de 0,9 s de reposo. Este tipo de onda permite simular el efecto causado por el tránsito vehicular.

Según el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (2001), existen factores que afectan el valor obtenido del módulo resiliente. Por ejemplo, el aumento del número de ciclos de carga que se le aplique al suelo hará que el valor del módulo aumente y esta tienda a un valor final constante. El incremento de la magnitud del esfuerzo desviador aplicado tiene como consecuencia una degradación del valor del módulo resiliente. Por otro lado, las propiedades índices que presente el suelo afectarán directamente el valor que se obtenga. Tal es el caso del peso específico, el contenido de humedad, los índices de plasticidad, entre otros.

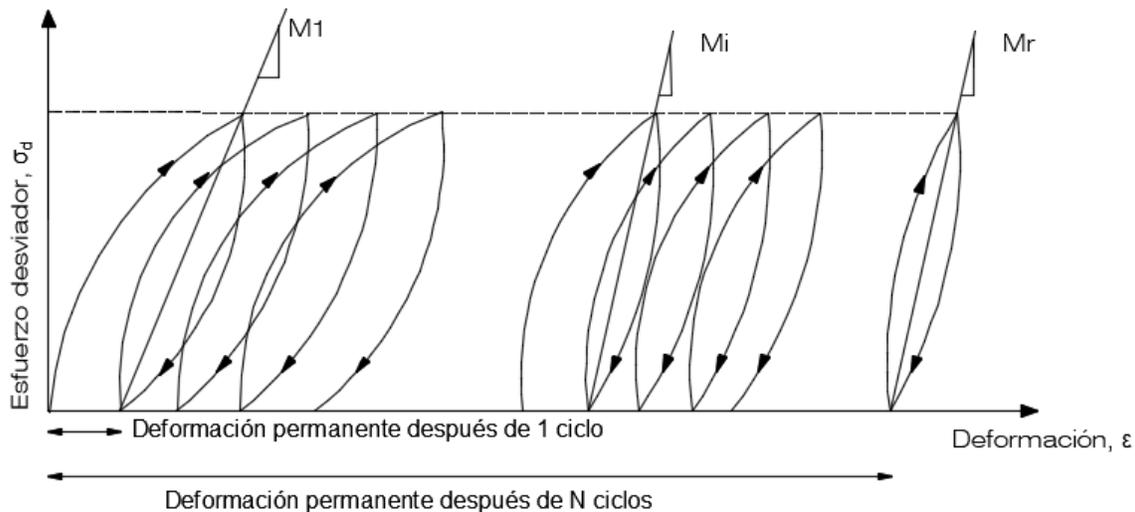


Figura 11. Efecto de un esfuerzo desviador respecto a la deformación permanente del suelo.

Fuente: Gárnica, Pérez y Lavariega (2002).

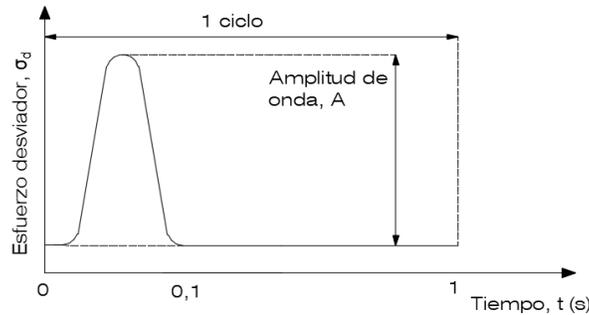


Figura 12. Esfuerzo desviador vs. tiempo, correspondiente a un pulso haversiano.
Fuente: modificado de (Romero, 2018)

Influencia de la consolidación

Cuando una capa de arcilla compresible saturada se somete a un aumento de su estado normal de esfuerzos, el exceso de presión de poros que se generan por la aplicación de las cargas se empieza a disipar de forma gradual. De manera que, el volumen inicial que tenía el suelo va disminuyendo con el tiempo (Braja, 2015).

El proceso de la consolidación se da en dos etapas conocidas como consolidación primaria y secundaria. Al final de la consolidación primaria, se ha disipado el exceso de presión de poro, la masa de suelo ha alcanzado un nuevo estado de esfuerzos efectivos y se ha producido una reducción del volumen inicial, debido a la expulsión del agua contenida por las capas de suelo, generando un reacomodo de las partículas hasta llegar a posiciones más estables.

Durante la consolidación secundaria se mantiene constante el nivel de esfuerzos efectivos que la masa de suelo alcanzó al finalizar la consolidación primaria. En esta etapa se produce un cambio volumétrico menos significativo asociado a un reacomodo de las partículas minerales. Este fenómeno de la consolidación secundaria es muy notorio en sedimentos que sean de origen lacustre, marino, y de aluviales finos (Saldierna, 1988).

Según (Ossa, 2004) una de las principales características presentadas por las arcillas de la cuenca del valle de México es la alta compresibilidad, lo cual ha tenido como consecuencia que para realizar diseños de cimentaciones, obras subterráneas y drenajes

se deba prestar especial atención al fenómeno de la consolidación del suelo.

El tema de la consolidación del suelo y su relación con la disipación del exceso de presión de poro ha sido estudiado durante varias décadas. Zaretskii (1973) menciona que, antes de iniciar el proceso de consolidación, el suelo se caracteriza por la ausencia de enlaces estructurales y conforme se disipa el exceso de presión de poros, la estructura del suelo se vuelve casi monofásica. Predomina la fase sólida, debido a la expulsión de agua; sin embargo, aún después de la disipación del exceso de presión de poro o, dicho en otros términos, aún después de la consolidación primaria, se mantiene una pequeña cantidad de agua almacenada entre los poros de la masa de suelo, aunque en una cantidad mucho menor que al inicio de la etapa de consolidación.

Liu y Zhang (2014) llevaron a cabo pruebas en arcillas de China, en las que se aplicaron cargas dinámicas con diferentes magnitudes de carga axial y frecuencias, así como diferentes presiones de confinamiento. Obtuvieron como resultado que el valor del E_{eq} aumenta conforme se aumenta la presión de confinamiento y que, además, las vibraciones generan un efecto negativo en el valor del módulo, pues conforme se aumentan la frecuencia de las vibraciones, el valor del módulo decrece.

Tras una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas acerca de la determinación del módulo de resiliencia (M_r) y módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) en suelos, bajo el efecto de la consolidación secundaria, respecto al módulo de resiliencia, no se encontró registro de investigaciones previas.

Metodología

Equipo utilizado para la realización de las pruebas

Para llevar a cabo la ejecución de los ensayos de laboratorio, se hizo uso de una cámara triaxial y un marco de carga MTS (Material Testing System), los cuales se encuentran conectados a un sistema de aplicación de carga (hidráulico), un panel de control, un sistema de aplicación de presión (confinante y contrapresión) y un sistema automatizado del equipo, que permite la captura y el procesamiento de los datos que durante la prueba se fueron obteniendo.

Características generales del equipo triaxial cíclico MTS

De acuerdo con lo mencionado por Flores, Gómez, Romo y Flores (2002), a continuación se presentarán diferentes aspectos y características del equipo utilizado para realizar las pruebas.

En el equipo triaxial cíclico MTS, se pueden realizar pruebas triaxiales de carácter estático, así como pruebas dinámicas, las cuales en ambos casos pueden ser a carga o desplazamiento controlado. Estas pueden ser aplicadas a probetas de suelos de diferentes relaciones de diámetro y altura, según sean las especificaciones del tipo de prueba.

En la Figura 13, se muestra un esquema del equipo triaxial utilizado para la aplicación de las pruebas.

A continuación, se dará una breve descripción de cada una de las secciones que lo componen.

Respecto a la aplicación de cargas, se utilizó un sistema hidráulico que trabaja con presión de aceite, el cual consta de una bomba que abastece de aceite a todo el sistema. De esta forma, hace que este suba y baje, aplicando una carga establecida.

El panel de control permite definir los valores límites del equipo, según el tipo de prueba que se desee realizar: esto debido a que la MTS puede trabajarse a carga o desplazamiento controlado. Además, cuenta con un sistema que permite aplicar la presión de confinamiento y la contrapresión.

Para la adquisición de datos y el procesamiento de información de cada una de las pruebas ejecutadas, se contó con un sistema automatizado de control de pruebas y procesamiento de datos, el cual se encuentra conformado por el equipo triaxial, un conjunto de sensores y una computadora. Lo mencionado anteriormente es lo que permite la realización de diferentes tipos de pruebas, tales como:

- Prueba estática: en esta prueba se puede aplicar un patrón de carga constante, a desplazamiento o carga controlada a una velocidad constante, esto con un tiempo de duración determinado.
- Prueba dinámica senoidal: en esta prueba se aplica una onda de tipo senoidal, a desplazamiento o carga controlada. Para ello se establecen los valores de la amplitud de la señal que será aplicada, el número de ciclos a aplicar y la frecuencia.

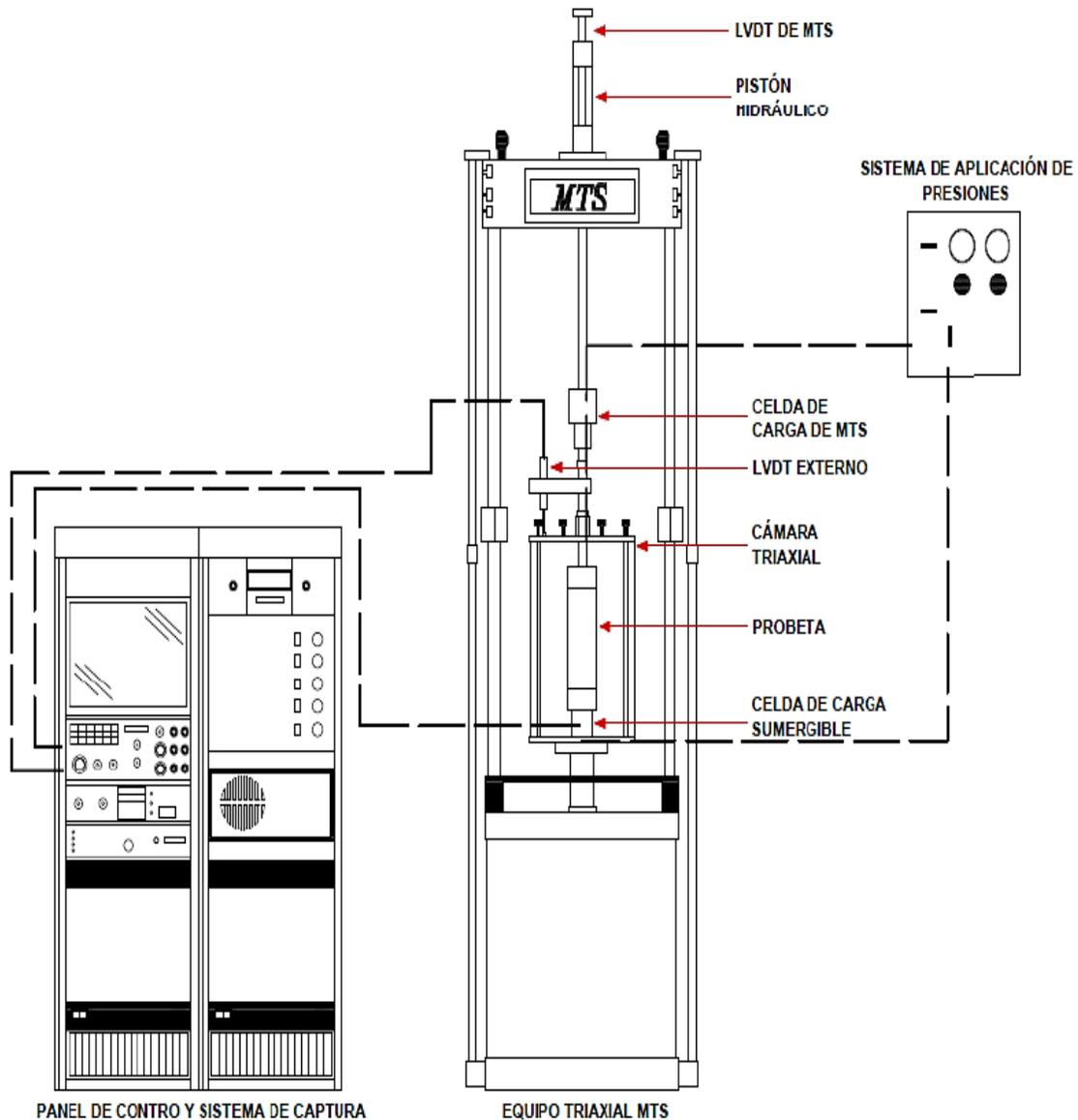


Figura 13. Esquema del equipo triaxial.
Fuente: Romero (2018).

Instrumentación del equipo

Para una correcta medición de los diferentes parámetros en cada una de las pruebas a realizar, la MTS cuenta con diferentes sensores e instrumentos que permiten llevar a cabo las mediciones y pruebas. A continuación, se presenta una breve descripción de los componentes más importantes:

- Sensor de desplazamiento de la MTS (LVDT, por sus siglas en inglés). Este

sensor se encuentra instalado directamente en el marco de carga y permite llevar a cabo las mediciones respectivas cuando se realicen pruebas a desplazamiento controlado.

- LVDT colocado en la tapa metálica de la cámara triaxial y se utiliza cuando se están realizando pruebas a carga controlada o con una amplitud baja. Mide las deformaciones generadas durante la aplicación de la carga dinámica.
- Celda de carga de la MTS que permite realizar las pruebas a carga

controlada. Se encuentra bajo el marco de carga y tiene una capacidad de 5000 kg.

- Celda de carga interna (sumergible), colocada en la base de la cámara triaxial, con una capacidad de 150 kg de carga máxima.
- Sensores de presiones, las cuales permiten llevar los registros de las presiones de confinamiento y contrapresión, aplicadas a las probetas de suelo durante las pruebas, además de la presión de poro medida en la parte inferior y superior de la probeta.
- Sensor de presión diferencial, la cual permite realizar las mediciones de los cambios volumétricos durante la etapa de saturación y consolidación. Cuenta con una bureta de una carrera total de 30 cm de columna de agua.

Debido a que, para realizar las pruebas en la MTS, se requiere la presencia de diferentes sensores para obtener los resultados, es necesario, antes de iniciar cualquier medición, realizar la calibración y la verificación de cada uno de estos sensores. Para ello, se obtienen las constantes de calibración de cada sensor, que garantizan que los datos obtenidos en las pruebas sean lo más precisos y exactos posible.

Características y propiedades de los materiales utilizados en las pruebas

En las tablas 2 y 3, se presentan las características más relevantes de las cuatro probetas de suelo ensayadas en este proyecto, provenientes del antiguo lago de Texcoco.

En la Figura 14 se presenta la carta de plasticidad. Las muestras SS-22 M 2-1 y SS-18 M 3-1 se clasifican como limos de alta plasticidad (MH), puesto que se encuentran a la derecha de la línea frontera y por debajo de la línea A. Por otra parte, las muestras SS-19M 2-1 y SS-16 M 3-1 se encuentran por arriba y sobre la línea A, respectivamente. Por lo tanto, se clasifican como arcillas de alta compresibilidad (CH).

Para el cálculo del contenido de agua (ω), la densidad de los sólidos (G_s) y los límites de consistencia, se tomaron como referencia las normas ASTM D 2216 (1998), ASTM D 854 (2002) y ASTM D 4318 (2000), respectivamente. Por otra parte, la clasificación en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) se llevó a cabo de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM D 2487 (2000).

Tabla 2. Límites de consistencia y clasificación SUCS.

Sondeo	Profundidad (m)	Contenido de agua	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Clasificación SUCS
		ω	L_w	L_p	I_p	
		(%)	(%)	(%)	(%)	
SS -22 M 2-1	10,00 - 10,20	228,65	261,64	118,05	143,58	MH
SS-19 M 2-1	8,00 - 8,20	241,77	271,88	90,27	187,28	CH
SS-16 M 3-1	7,90 - 8,10	247,70	274,34	87,07	181,61	CH
SS-18 M3-1	8,20 - 8,37	94,28	112,10	50,92	82,86	MH

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Relaciones volumétricas.

Sondeo	Peso volumétrico	Densidad de sólidos	Relación de vacíos inicial	Grado de saturación
	y_m (g/cm ³)	G_s	e_0	S_r (%)
SS -22 M 2-1	1,26	3,42	7,94	98,46
SS-19 M 2-1	1,19	3,53	9,11	93,61
SS-16 M 3-1	1,22	3,19	8,10	97,70
SS-18 M 3-1	1,40	2,92	3,05	90,32

Fuente: elaboración propia.

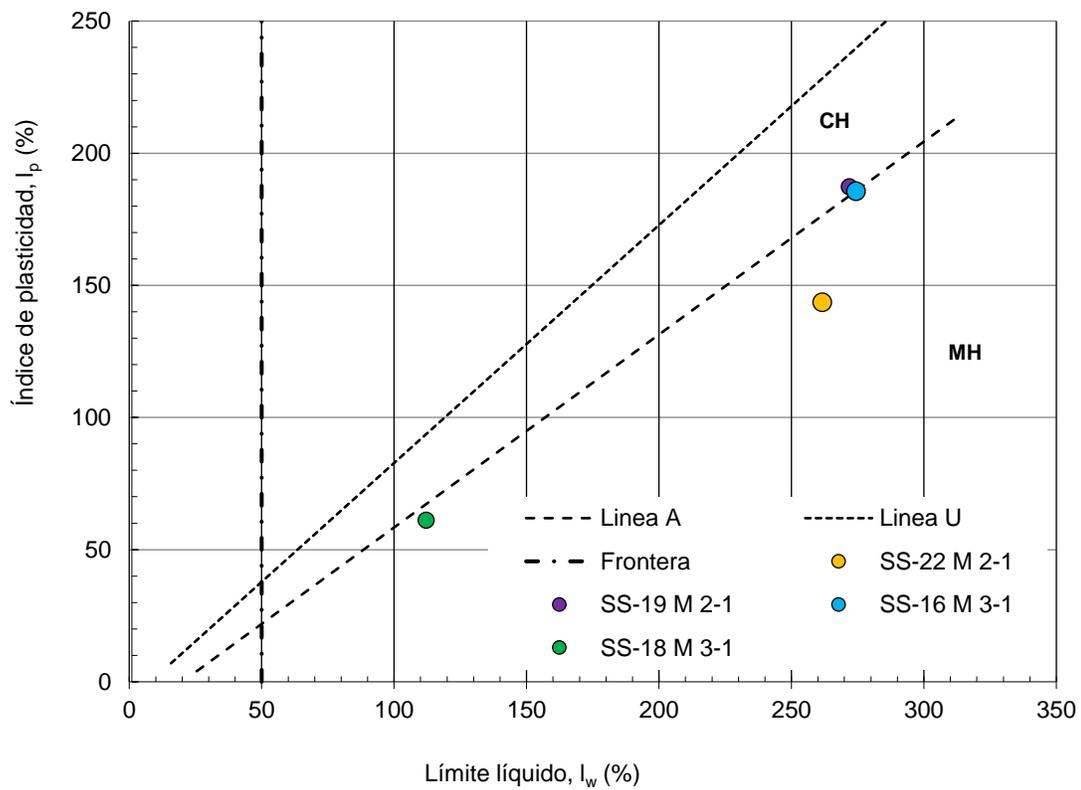


Figura 14. Clasificación de las muestras ensayadas de acuerdo con el sistema SUCS.
Fuente: elaboración propia.

Preparación de las probetas de suelo

Las muestras de suelo con las que se trabajaron fueron extraídas con un tubo tipo Shelby. Las profundidades correspondientes se pueden apreciar en la Tabla 2.

Una vez extraídas, las muestras se almacenaron en un cuarto húmedo con el objetivo de minimizar la pérdida de humedad original.

Los tubos Shelby fueron cortados en tramos de aproximadamente 20 cm y, en los extremos superior e inferior, se les colocó un sello de parafina/cera, el cual previene la pérdida de humedad.

Las dimensiones finales de las probetas de suelo se seleccionaron de acuerdo con lo que se indica en las normas respectivas para la determinación del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) norma ASTM D 3999 (1991) y el módulo resiliente (M_r) norma AASTHO T 307 (2002).

En el caso de la norma ASTM D 3999 (1991), se establece que el diámetro mínimo que se debe cumplir es de 3,6 cm y, en el caso de la norma AASTHO T 307 (2002), se establece que un valor mínimo de 7,1 cm.

De esta manera, se determinó que el valor del diámetro utilizado debía ser el mínimo dictado por la norma para la determinación del M_r .

Por otra parte, ambas normas concuerdan en el hecho de mantener una relación de diámetro/altura de 2:1. Por lo tanto, la altura seleccionada para las probetas fue de 14 cm, como mínimo.

Con el objetivo de no alterar las muestras de suelo durante los procesos de labrado y corte, se trataron con cuidado extremo; además, durante estos procesos, los excedentes de suelo retirados se recolectaron por aparte para realizar pruebas de contenido de humedad, obtención de la densidad de sólidos y los valores de índices propios de cada una de las muestras.

Una vez extraída la muestra de suelo del tubo Shelby, se procedió a darles las dimensiones requeridas para la ejecución de los ensayos. Se labró la muestra en un torno al diámetro y altura que se requería.

Montaje de la muestra

El primer paso de la etapa de montaje es realizar la saturación de las líneas que se encuentran conectadas a la cámara. La saturación de las líneas es necesaria para eliminar cualquier presencia de aire dentro del sistema. Por medio de estas líneas es que se realizaron los procesos de saturación y consolidación de las probetas de suelo, puesto que es por donde ocurre el cambio volumétrico. Además de las líneas, se saturaron las piedras porosas que se encuentran colocadas en ambos extremos de donde se colocaron la probeta de suelo dentro de la cámara triaxial.

A la probeta de suelo se le colocó un papel filtro alrededor y en los extremos. Su objetivo es facilitar el transporte del agua de las zonas medias de la probeta hasta los extremos superiores e inferiores. Según las normas correspondientes, el tipo de papel utilizado no debe de disolverse en el agua, para evitar problemas al realizar los ensayos. Además, se indica que el papel no debe cubrir el 50 % de la periferia de la probeta de suelo.

Se colocó a la muestra una membrana de látex, como interfaz del elemento confinante y la muestra de suelo. De acuerdo con las normas, el valor del diámetro no estirado de la membrana utilizada se encuentra entre el 90 y 95% del diámetro de la muestra, lo que permite que la membrana se adhiera lo suficiente a la superficie. La altura de la membrana es de 20 cm; de esta manera, puede cubrir totalmente la probeta, además de ser sellada con o-rings que impiden que por los extremos le ingrese agua a la muestra de suelo.

Para colocar la membrana, se utilizó un tubo partido que permitió introducir la probeta de suelo dentro de la membrana para luego colocarla en el pedestal de la cámara triaxial.

Al concluir lo anterior, se coloca la camisa de lucita que rodea la cámara triaxial, Posteriormente, se selló la parte superior de la cámara para evitar cualquier fuga de las presiones aplicadas.

Finalmente, la cámara se acopla a la MTS, lugar en donde se procedió a realizar el llenado con agua hasta un punto en el que se cubre la totalidad de la muestra de suelo. Además, en este punto se realizó la conexión de los sensores que van conectados a la

cámara encargados de medir los diferentes parámetros de los ensayos aplicados.

Etapa de saturación y obtención de B de Skempton

Antes de iniciar con las etapas de consolidación y ensayos, se debe garantizar que la probeta de suelo se encuentre totalmente saturada; más específicamente, cuando la B de Skempton sea igual o mayor a 0,96, según la norma ASTM D 4767 (1996). Se utilizó el método de saturación por contrapresión, el cual, según Córdoba (1986), consiste en la aplicación de una presión que excede a la presión hidrostática en el interior de la muestra. Para ello, se aplican al mismo tiempo incrementos de presión confinante y contrapresión. En este caso, la contrapresión

actúa de forma tal que reduce y/o disuelve el volumen de las burbujas de aire presentes en la muestra de suelo, lo que hace que estas se compriman y el espacio sea ocupado por agua.

Según la norma ASTM D 4767 (1996), la B de Skempton se calcula como se muestra a continuación:

$$\beta = \frac{\mu_f - \mu_i}{\sigma_{cf} - \sigma_{ci}} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\sigma_c} \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde

$\Delta\mu$: Cambio en la presión de poro producto de la presión de confinamiento aplicada.

$\Delta\sigma_c$: Incremento en la presión de confinamiento aplicada.

Para una mejor explicación de la secuencia de pasos realizada para preparar las probetas de suelo, el montaje de la cámara triaxial y obtener la B de Skempton se muestra la Figura 15.

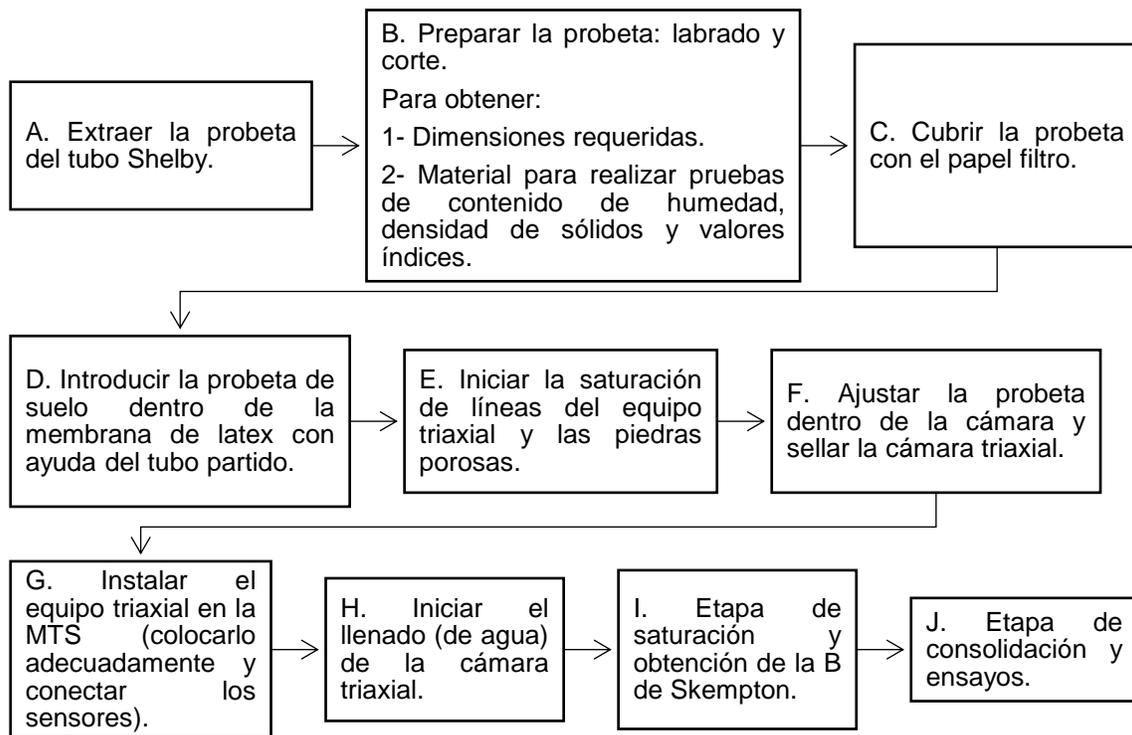


Figura 15. Diagrama del procedimiento para la preparación y montaje
Fuente: elaboración propia.

Etapa de ensayo

Consolidación

El procedimiento para la etapa de consolidación consistió en aplicar un esfuerzo de contrapresión y diferentes incrementos de esfuerzo de confinamiento, los cuales permiten obtener, en este caso, los esfuerzos efectivos de interés para el desarrollo de los ensayos.

La probeta de suelo empieza a experimentar un cambio volumétrico por disipación de la presión de poro e inicia el proceso de consolidación. Cuando en cada incremento de esfuerzo efectivo específico se disipa el exceso de presión de poro, el cambio volumétrico tiende a cero ($\Delta V \approx 0$), de manera que, tomando en cuenta lo anterior en conjunto con el criterio de Taylor, se define el término de la consolidación primaria y se da inicio a la etapa de la consolidación secundaria.

Medición de los módulos E_{eq} y M_r

Ya que la intención es determinar cuál es la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible en

cada uno de los incrementos de esfuerzos efectivos aplicados, se midieron los módulos (E_{eq} y M_r). La primera medición se realizó al término de la etapa de la consolidación primaria (etapa 1). Posteriormente, se continuó con el proceso de consolidación secundaria, manteniendo el mismo valor del esfuerzo efectivo aplicado. La consolidación secundaria se dividió en dos etapas: 24 horas (etapa 2) y 48 horas (etapa 3) posterior al término de la consolidación primaria. Al finalizar cada una de dichas etapas, se realizó la medición de los módulos.

Lo anterior se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la diferencia que existe entre los valores de los módulos (E_{eq} y M_r) durante la consolidación primaria y secundaria.

En la Figura 16, se muestra un diagrama que ejemplifica la forma en que se desarrolló la etapa de ensayos y medición de los módulos, además de las etapas en las que se realizó la consolidación primaria y secundaria. Lo mostrado en dicho diagrama representa el procedimiento seguido para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados.

En la Figura 17, se muestra un diagrama en donde se evidencia que para una misma probeta se aplicaron diferentes incrementos de esfuerzo efectivo (σ') y que en cada uno de ellos se realizaron las respectivas mediciones de los módulos E_{eq} y M_r en sus respectivas etapas de consolidación (1, 2 y 3).



Figura 16. Descripción del proceso de consolidación y medición de los módulos para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados.

Fuente: elaboración propia.

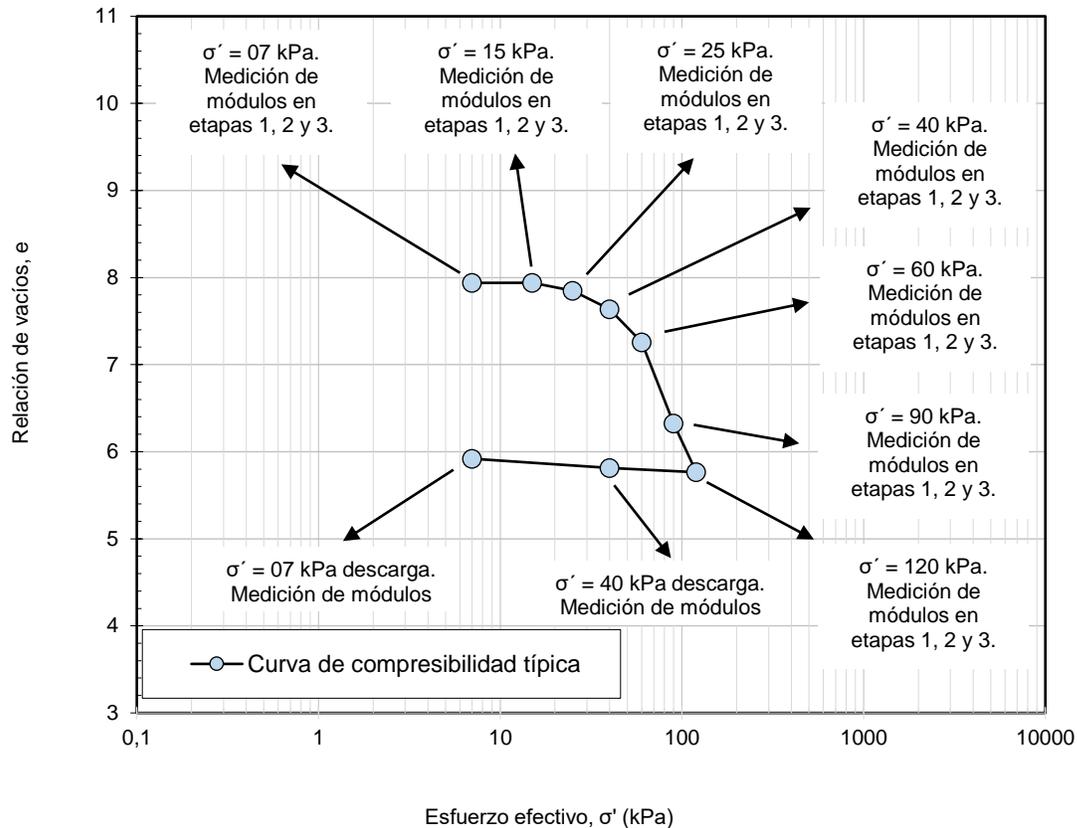


Figura 17. Medición de los módulos en cada incremento de esfuerzo efectivo (σ') aplicado y en sus respectivas etapas de consolidación.
Fuente: elaboración propia.

Descripción de las cargas y las ondas aplicadas

Los valores de la amplitud, la carga, la frecuencia utilizada y el número de ciclos aplicados se basan en la experiencia adquirida en investigaciones pasadas realizadas en suelos blandos del valle de México en el Laboratorio de Vías Terrestres y Mecánica de Suelos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, tomando como referencia las normas ASTM D 3999 (1991) para el caso de la obtención de E_{eq} , y AASTHO T 307 (2002) para el cálculo de M_r .

Al aplicarse cada una de las cargas axiales cíclicas, se obtuvo la variación de la deformación axial generada, con lo cual se graficaron las curvas correspondientes y

posteriormente se realizaron los cálculos respectivos para la obtención de los valores de los módulos.

En las tablas 4 y 5 se encuentra un resumen de las cargas aplicadas durante las mediciones, así como el tipo de onda, su frecuencia y el número de ciclos aplicados para cada uno de los módulos. Se puede apreciar que en ambos casos los valores que se variaron fueron las cargas aplicadas. La diferencia para obtener el módulo dinámico equivalente de Young y el módulo resiliente es únicamente la onda de la carga inducida, puesto que, para la determinación de E_{eq} , se aplicó una onda de tipo senoidal y, para la determinación de M_r , se aplicó una onda de tipo haversiano. Una comparación entre las ondas se puede apreciar en la Figura 18.

Tabla 4. Descripción de los parámetros aplicados en los ensayos triaxiales para obtener el módulo E_{eq} .

Carga aplicada (kg)	Parámetros para la obtención de E_{eq}	
1	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	20
	Tipo de onda	Senoidal
2	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	20
	Tipo de onda	Senoidal
3	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	20
	Tipo de onda	Senoidal
4	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	20
	Tipo de onda	Senoidal
5	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	20
	Tipo de onda	Senoidal

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Descripción de los parámetros aplicados en los ensayos triaxiales para obtener el módulo M_r .

Carga aplicada (kg)	Parámetros para la obtención de M_r	
1	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	100
	Tipo de onda	Haversiano
2	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	100
	Tipo de onda	Haversiano
3	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	100
	Tipo de onda	Haversiano
4	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	100
	Tipo de onda	Haversiano
5	f (Hz)	1
	Número de ciclos (N)	100
	Tipo de onda	Haversiano

Fuente: elaboración propia.

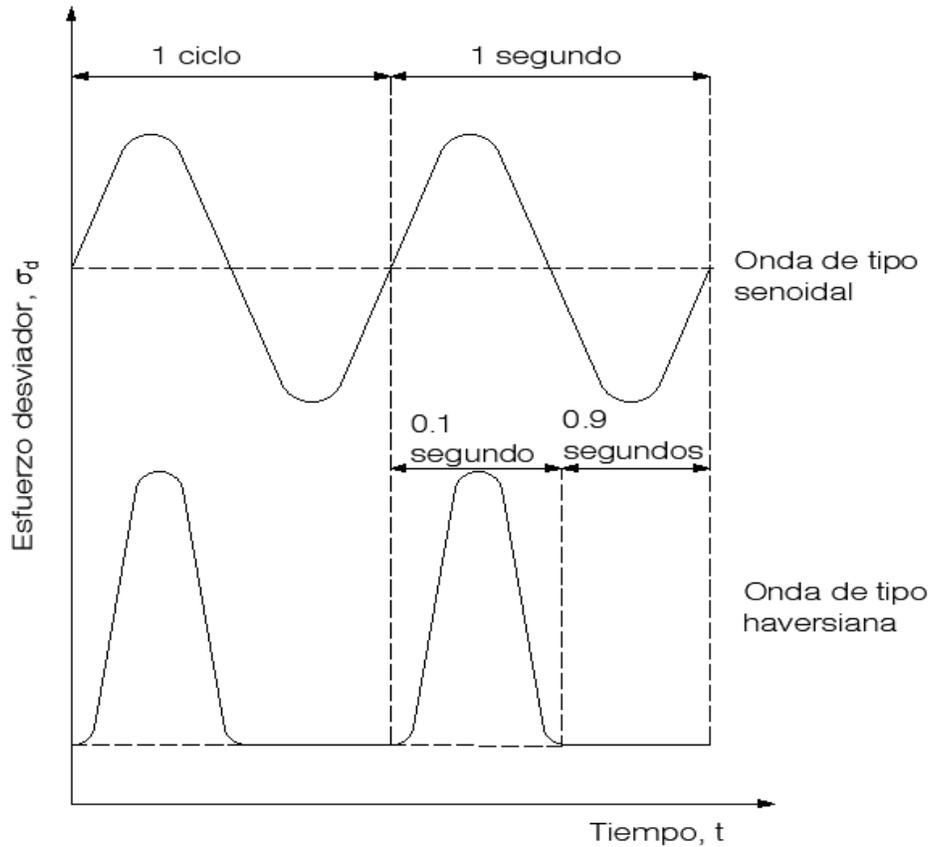


Figura 18. Comparación entre una onda de tipo senoidal y de tipo haversiano.
Fuente: elaboración propia.

Cálculo de parámetros

El cálculo de los valores del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y módulo resiliente (M_r) se hicieron según las normas ASTM D 3999 (1991) y AASTHO T 307 (2002), respectivamente. Ambos módulos son muy similares, dado que son una relación entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación axial generada a causa de ese esfuerzo. Su variación radica sobre todo en el tipo de onda aplicada a la hora de realizar el ensayo y la cantidad de ciclos aplicados.

A continuación, se presenta el procedimiento para llevar a cabo los cálculos necesarios para la obtención de los módulos:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{H_0}$$

Ecuación 5

Donde:

- ε = deformación unitaria axial recuperable (mm/mm)
- δ = deformación axial producto de la aplicación del esfuerzo (mm)
- H_0 = altura inicial de la probeta (mm)

$$A_c = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$$

Ecuación 6

Donde:

- A_c = área corregida de la probeta de suelo (cm^2)
- A_0 = área transversal inicial de la probeta de suelo (cm^2)
- ε = deformación unitaria axial recuperable (mm/mm)

Para el caso del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}):

$$\sigma_d = \frac{P}{A_c} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

σ_d = esfuerzo desviador (kg/cm^2)
 P = carga axial aplicada con onda de tipo senoidal (kg)
 A_c = área corregida de la prueba de suelo (cm^2)

$$E_{eq} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

E_{eq} : módulo dinámico equivalente de Young (MPa)
 ε = deformación unitaria axial recuperable (mm/mm)
 σ_d = esfuerzo desviador, (kg/cm^2)

Para el caso del módulo resiliente (M_r):

$$\sigma_d = \frac{P}{A_c} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

σ_d = esfuerzo desviador, (kg/cm^2)
 P = carga axial aplicada con onda de tipo Haversiano, (kg)
 A_c = área corregida de la prueba de suelo, (cm^2)

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

M_r : módulo de resiliencia (MPa)
 σ_d = esfuerzo desviador, (kg/cm^2)
 ε = deformación unitaria axial recuperable (mm/mm)

Por otra parte, se presenta una ecuación que permite relacionar la relación de vacíos inicial de la probeta de suelo, el volumen inicial y el cambio volumétrico ocurrido en el tiempo, para obtener la relación

de vacíos final para cada uno de los incrementos de esfuerzos efectivos utilizados en la consolidación y en cada una de sus etapas.

$$e_f = e_0 - \frac{\Delta V}{V_0} (1 + e_0) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

e_f : relación de vacíos final
 e_0 : relación de vacío inicial
 ΔV : cambio de volumen (cm^3)
 V_0 : volumen inicial (cm^3)

Esfuerzo de preconsolidación

Según Casagrande (1936) el esfuerzo de preconsolidación se puede estimar a partir de la gráfica de laboratorio de e vs $\log \sigma'$ de una prueba de consolidación (como se observa en la Figura 19) que relaciona los esfuerzos efectivos aplicados con la relación o índice de vacíos. El procedimiento se describe a continuación:

- Por observación visual, establecer un punto a en el que la dirección de la gráfica e vs $\log \sigma'$ tiene un radio mínimo de curvatura.
- Dibujar una línea horizontal ab.
- Dibujar la línea ac tangente en a.
- Dibujar la línea ad, que es la bisectriz del ángulo bac.
- Proyectar la parte recta gh de la gráfica e vs $\log \sigma'$ y trazar de nuevo para intersectar ad en f.
- La abscisa del punto f es la presión de preconsolidación, σ'_c .

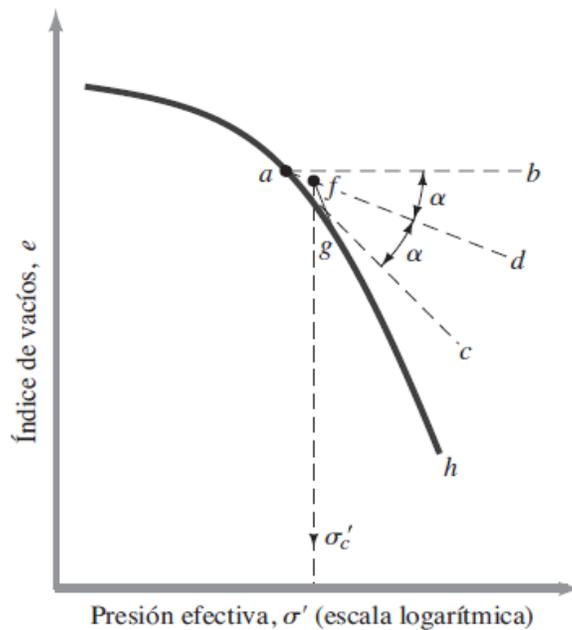


Figura 19. Procedimiento gráfico para determinar la presión de preconsolidación.
Fuente: Casagrande (1936).

Aclaraciones del uso de las normas

En el año 2018, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizó una investigación a cargo de Romero (2018) que consistió en una comparación entre el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) y el módulo de resiliencia del suelo (M_r); para determinar los módulos, se utilizaron las normas ASTM D 3999 – 1991 y AASTHO T 307 – 2002, respectivamente.

Romero (2018) desarrolló un procedimiento alternativo para el cálculo de los módulos. Las modificaciones realizadas se deben a que la secuencia de cargas descritas en las normas llevaría a la falla a las probetas de suelo como resultado de las características de resistencia al esfuerzo cortante de la arcilla en cuestión. Por lo tanto, la definición de las cargas cíclicas axiales que se aplicarían a la hora de llevar a cabo las mediciones de los módulos se realizó con base en resultados obtenidos de pruebas de resistencia estáticas. Esto hizo que los niveles de esfuerzo cortante cíclico inducido fueran menores que la

resistencia cortante estática, con el fin de no llegar a producir la falla en la probeta.

Debido a que en este proyecto de graduación también se determinarían los módulos E_{eq} y M_r en arcillas provenientes del antiguo lago de Texcoco, se siguió el procedimiento ya establecido anteriormente en el Instituto de Ingeniería.

Tomando en cuenta estudios previos realizados en la zona del antiguo lago de Texcoco, se escogió de manera preliminar el esfuerzo de preconsolidación que tendrían las muestras de suelos, para así seleccionar los incrementos de esfuerzo efectivo aplicados en los ensayos triaxiales con la intención de definir satisfactoriamente la curva de compresibilidad: relación de vacíos (e) vs esfuerzo efectivo ($\log \sigma'$), con 3 incrementos ubicados en el tramo recompresión, 3 incremento en el tramo virgen y 2 descargas.

Para cada incremento de esfuerzo efectivo, se aplicaron diferentes magnitudes de carga cíclica axial en orden ascendente, en este caso fueron cargas desde 1 kg hasta 5 kg.

Resultados

Curvas de compresibilidad

Para cada una de las probetas de suelo ensayadas, se trazó la curva de compresibilidad obtenidas durante las etapas

de la consolidación, en términos de la relación de vacíos (e) y los esfuerzos efectivos (σ') aplicados. También se calculó el esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) según el método de Casagrande (1936). En las Figura 20–Figura 23, se aprecian dichas curvas con sus respectivos valores del esfuerzo de preconsolidación.

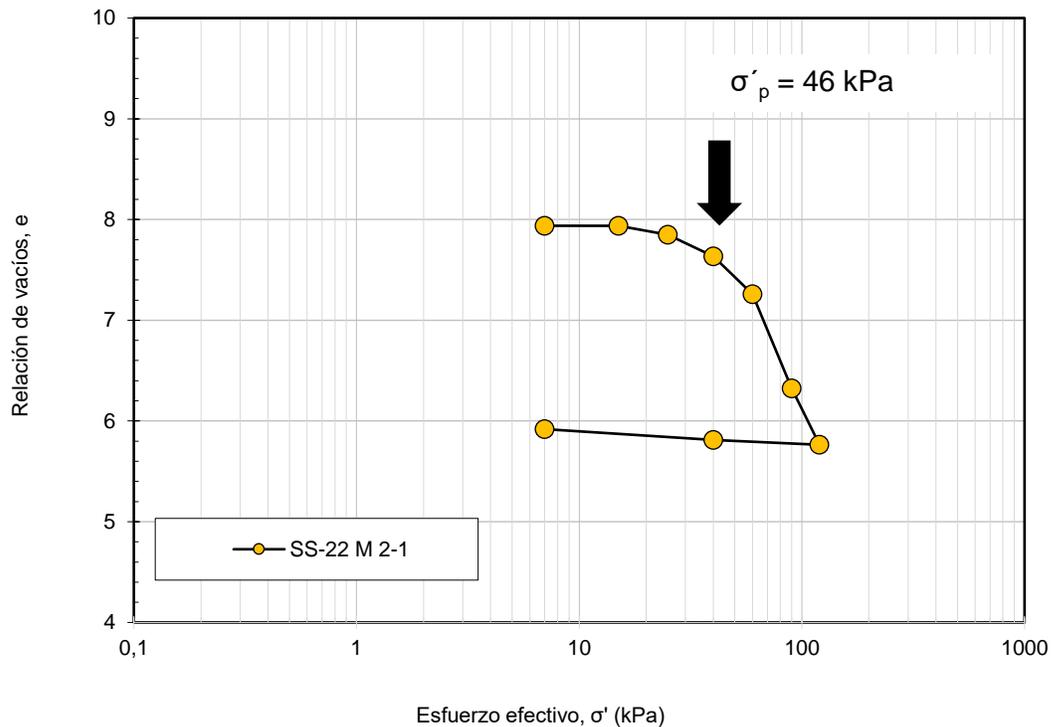


Figura 20. Curva de compresibilidad, muestra SS-22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

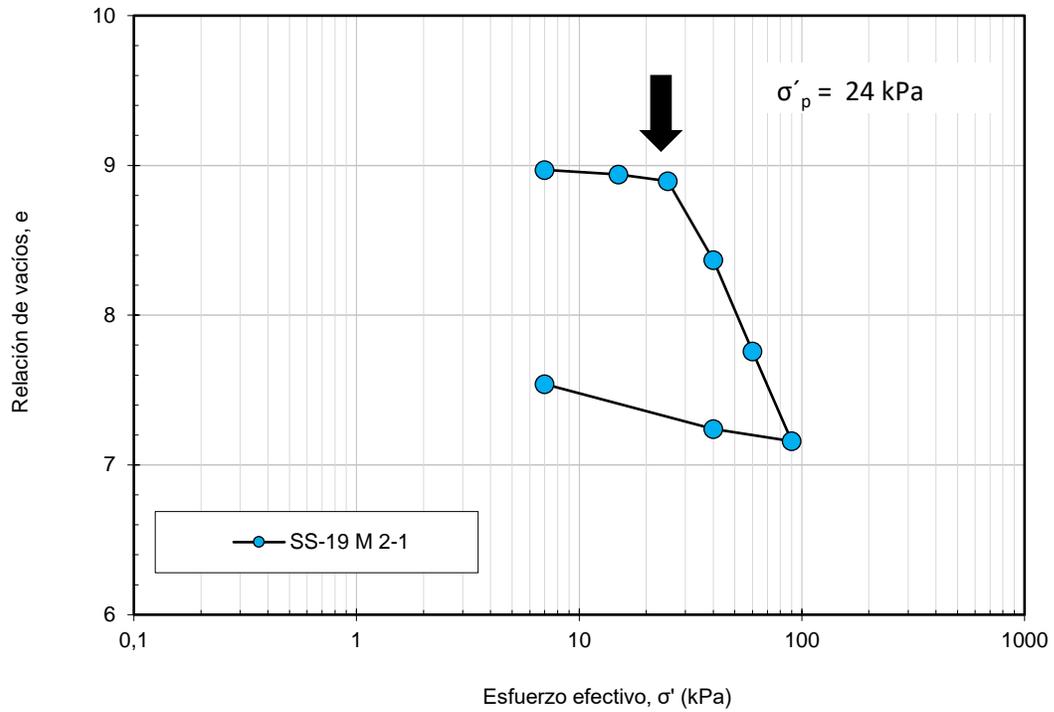


Figura 21. Curva de compresibilidad, muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

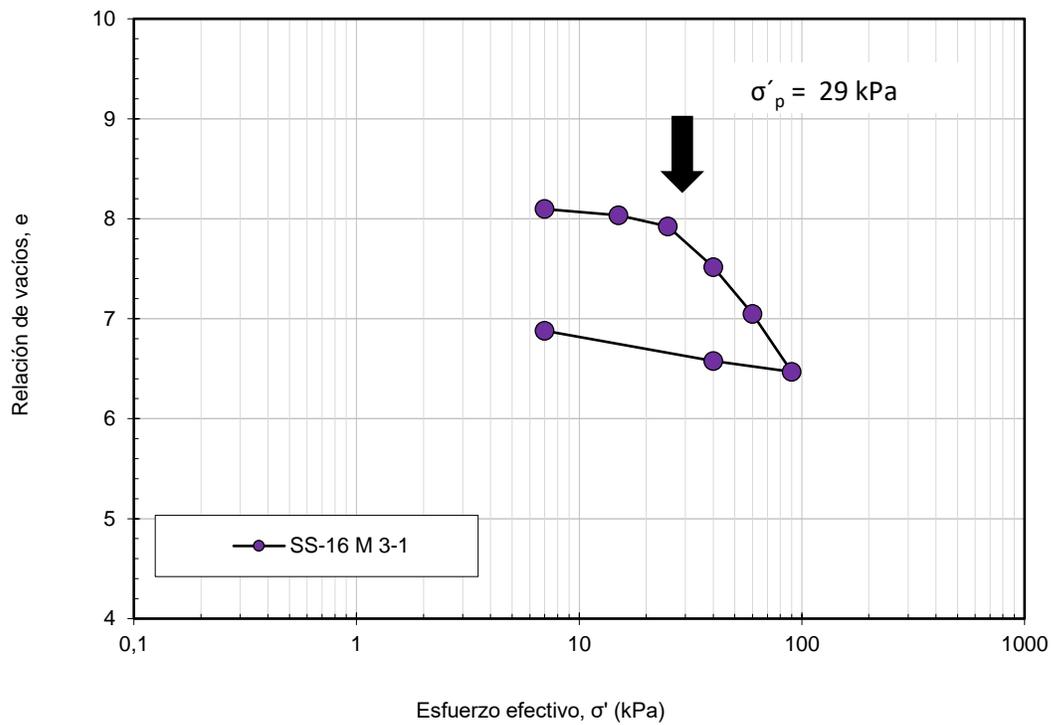


Figura 22. Curva de compresibilidad, muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

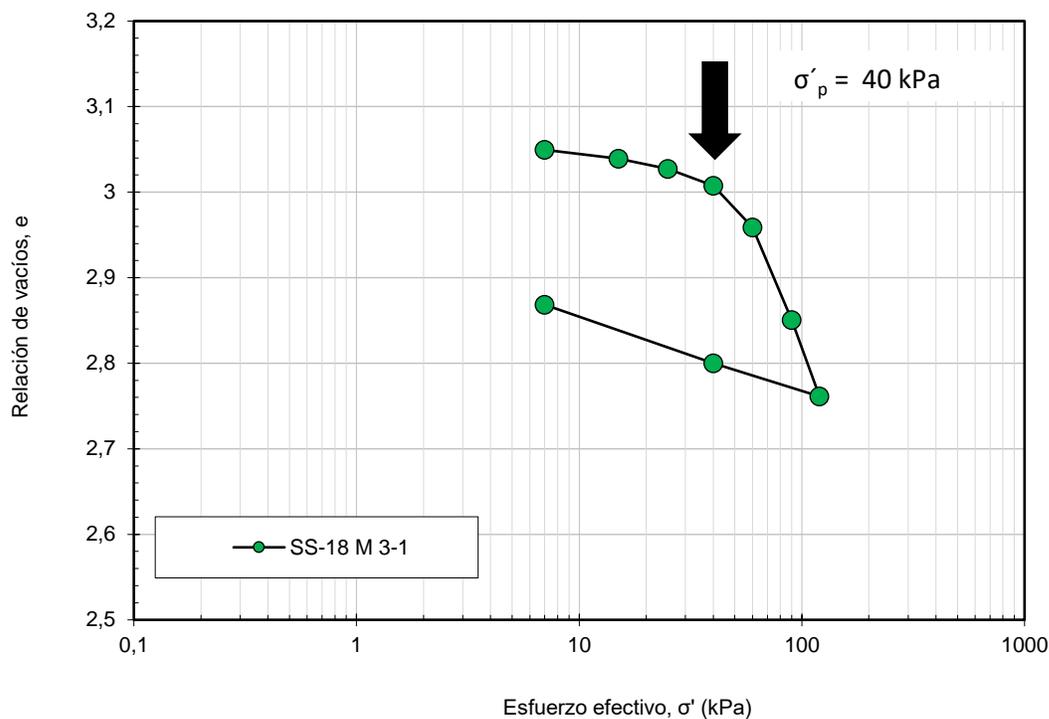


Figura 23. Curva de compresibilidad, muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

Cálculo de los módulos E_{eq} y M_r

En las Figura 24–Figura 29, se presenta el comportamiento de las curvas esfuerzo desviador (σ_d) vs deformación (ϵ).

Como se puede observar, al graficar cada uno de los esfuerzos desviadores aplicados, con su respectiva deformación durante la aplicación de los ciclos de carga, se forma un ciclo de histéresis. Esto permite calcular los módulos según sea el caso. Las pendientes presentadas en cada una de las figuras representan el valor del módulo obtenido tras la aplicación de cada uno de los esfuerzos.

Los resultados corresponden a la muestra SS-16 M 3-1, para un esfuerzo efectivo de 60 kPa y en sus diferentes etapas de consolidación. Se muestran únicamente estos ciclos, puesto que la intención es demostrar la forma de los ciclos de histéresis y la manera de realizar el cálculo de los módulos. Para cada una de las probetas ensayadas, en cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación, se obtuvieron los ciclos de histéresis correspondientes. Esto permitió realizar el cálculo de cada uno de los módulos.

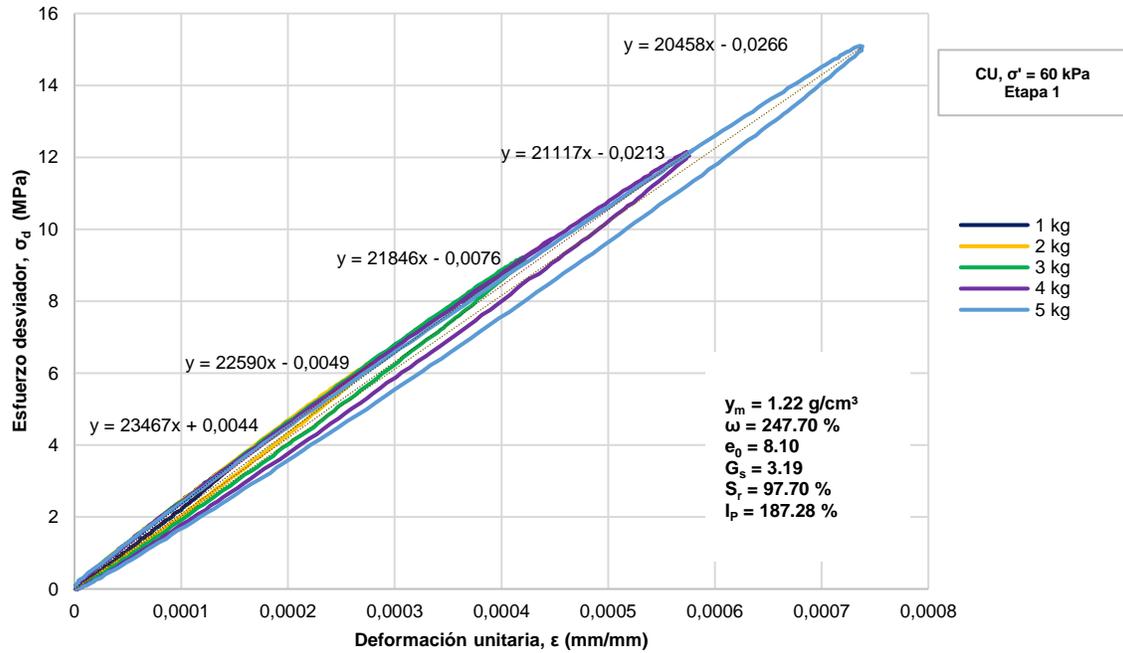


Figura 24. Curva ϵ vs. σ_d , para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

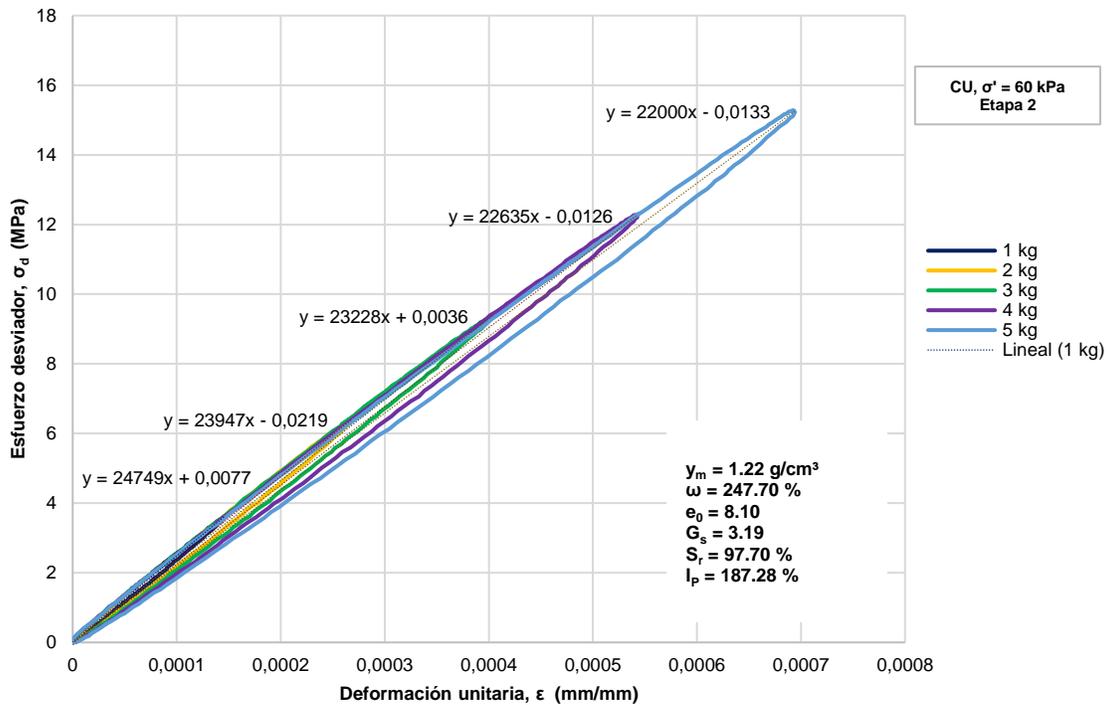


Figura 25. Curva ϵ vs. σ_d , para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

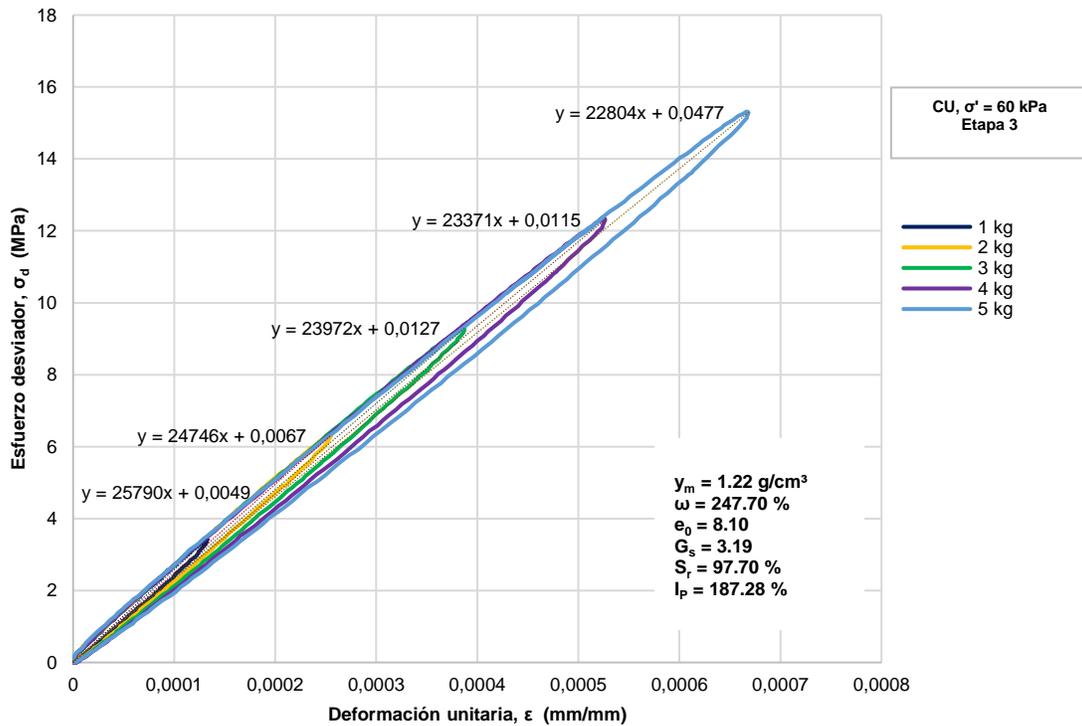


Figura 26. Curva ϵ vs. σ_d , para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

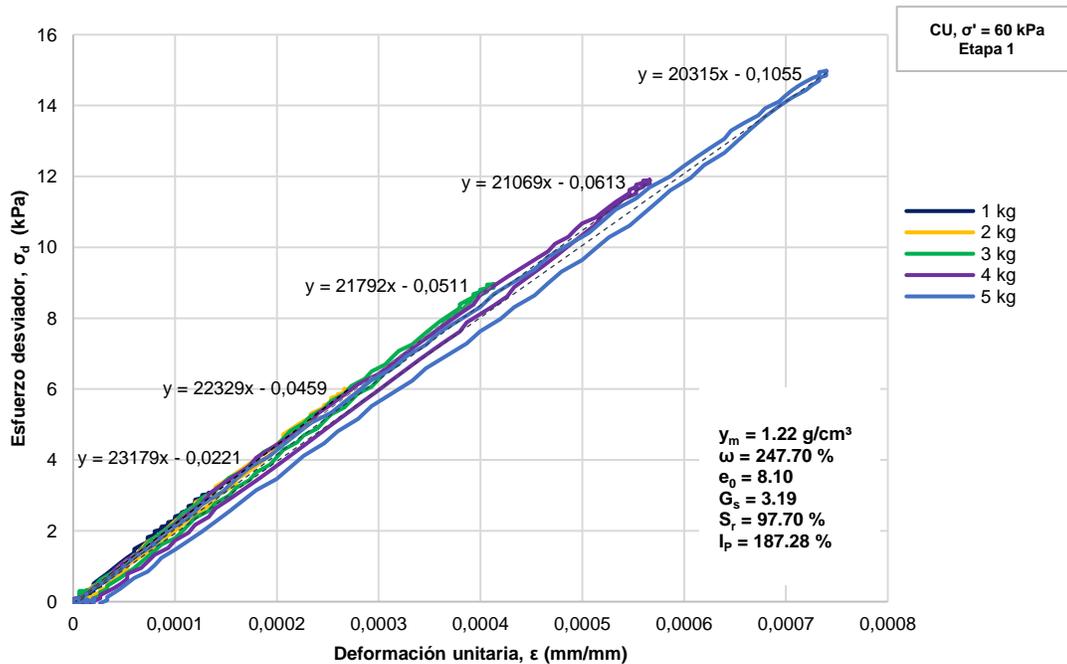


Figura 27. Curva ϵ vs. σ_d , para obtener el módulo Resiliente (M_r), correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

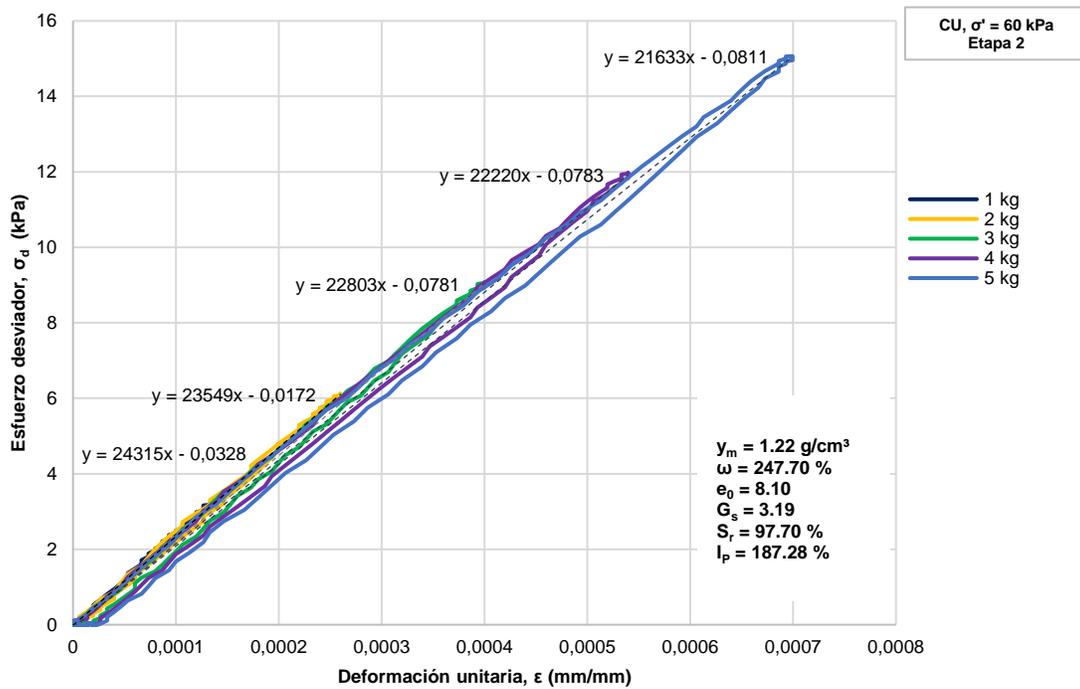


Figura 28. Curva ϵ vs. σ_d , para obtener el módulo Resiliente (M_r), correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.

Fuente: elaboración propia.

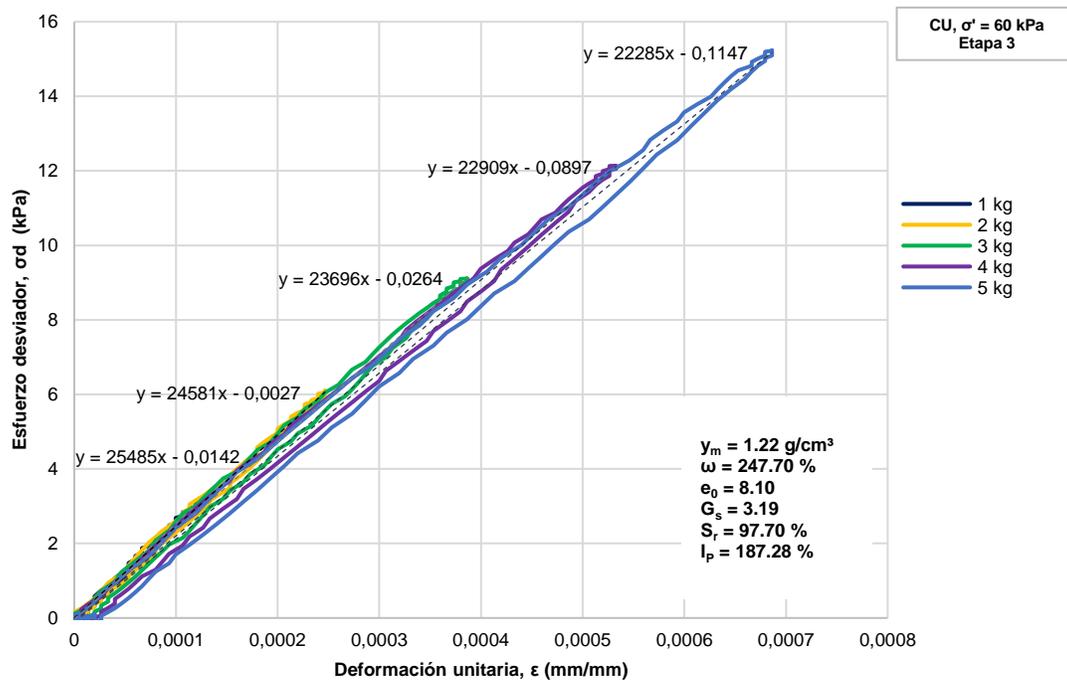


Figura 29. Curva ϵ vs. σ_d , para obtener el módulo Resiliente (M_r), correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.

Fuente: elaboración propia.

Influencia del esfuerzo desviador cíclico.

En las Figura 30–Figura 37, se pueden apreciar los valores de los módulos (E_{eq} y M_r) contra los esfuerzos desviadores (σ_d) aplicados a cada una de las muestras ensayadas.

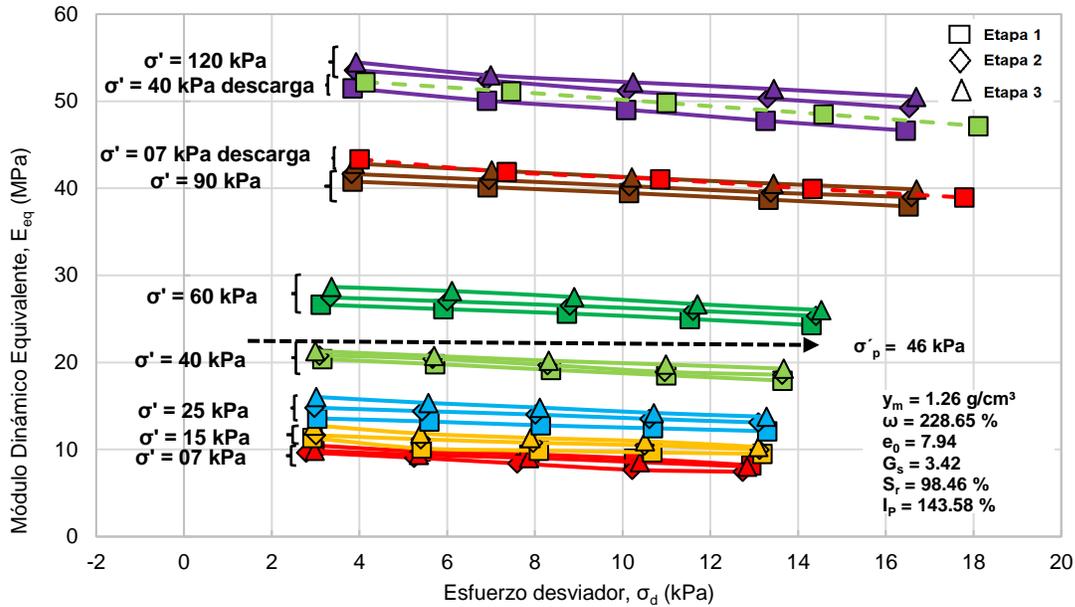


Figura 30. Curva σ_d vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

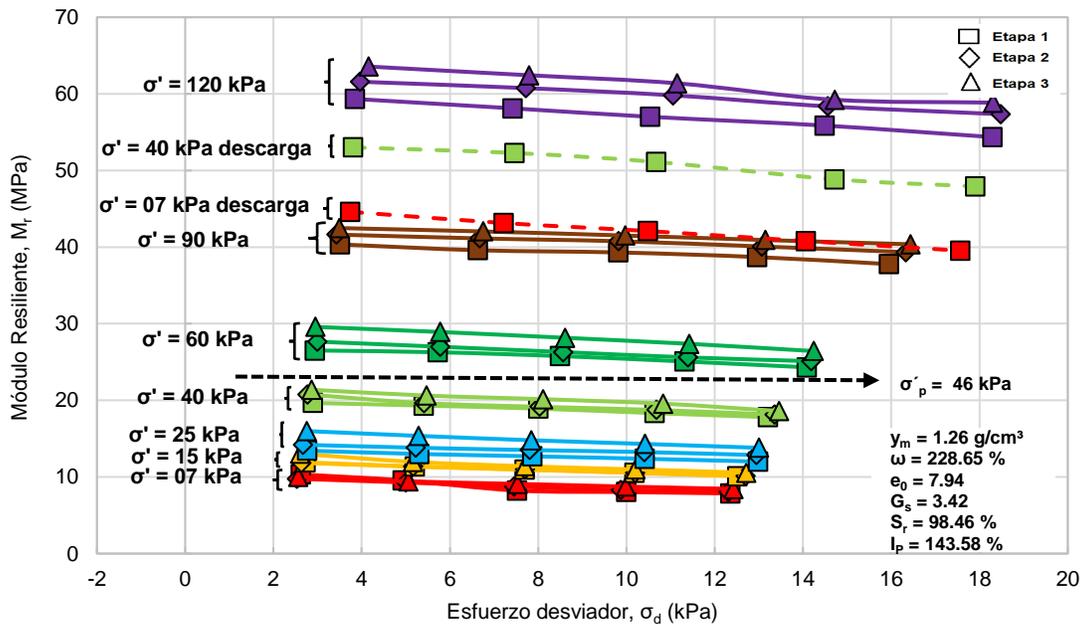


Figura 31. Curva σ_d vs. M_r correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

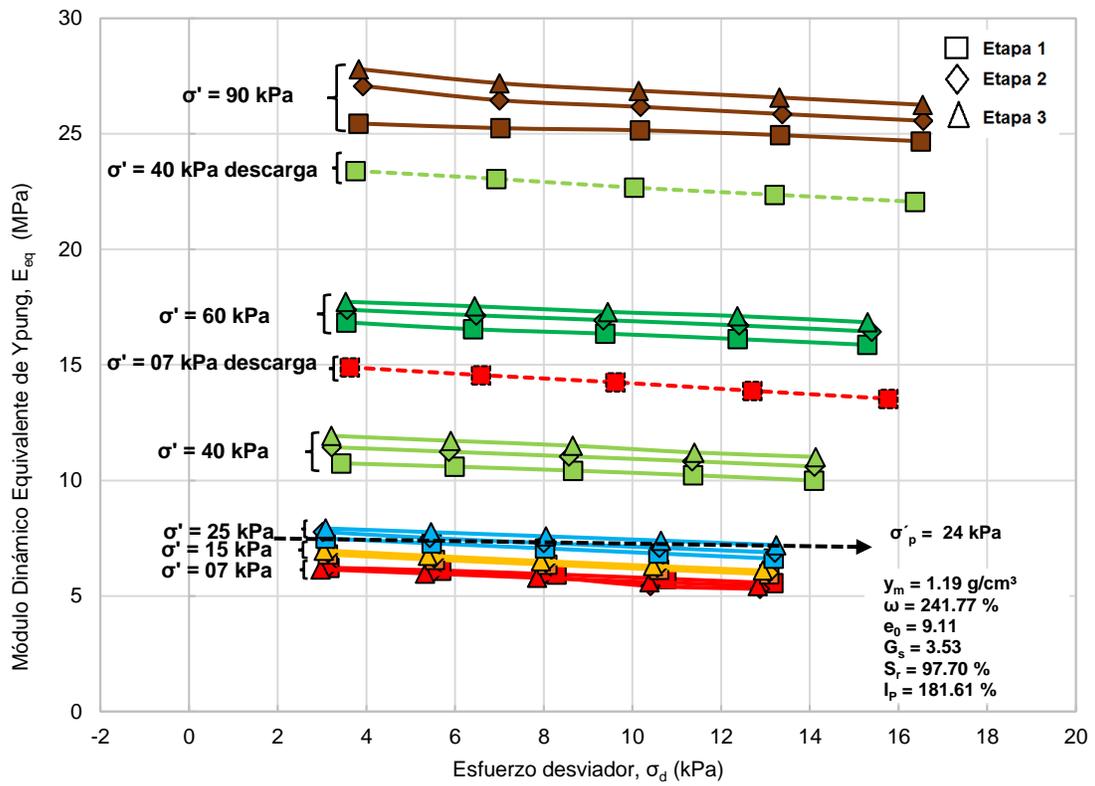


Figura 32. Curva σ_d vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

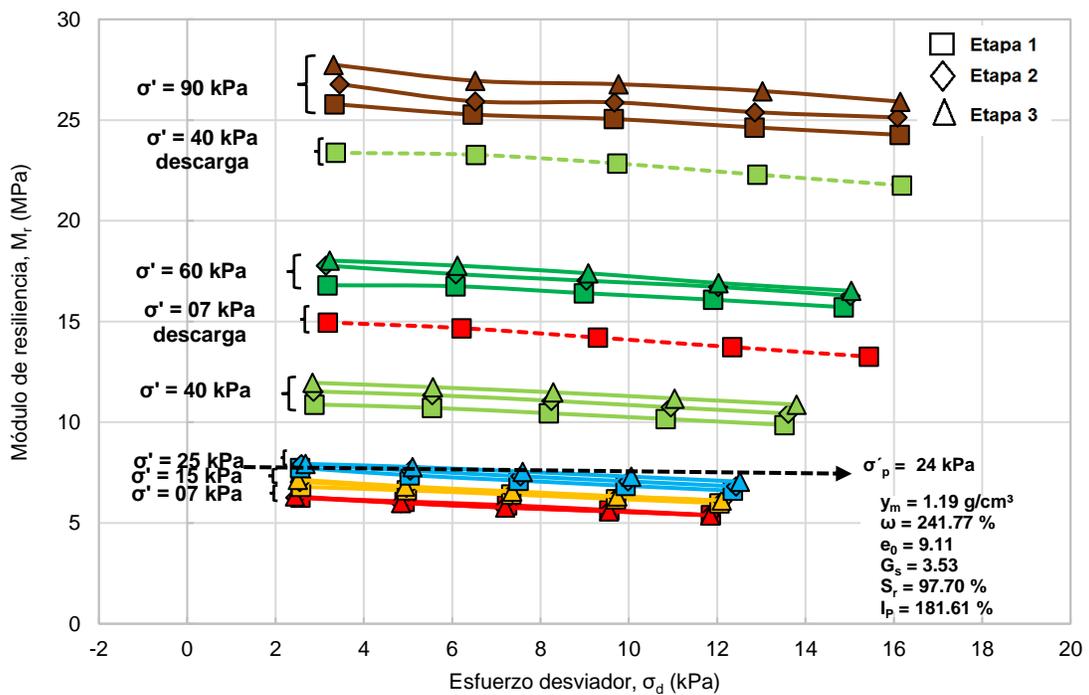


Figura 33. Curva σ_d vs. M_r correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

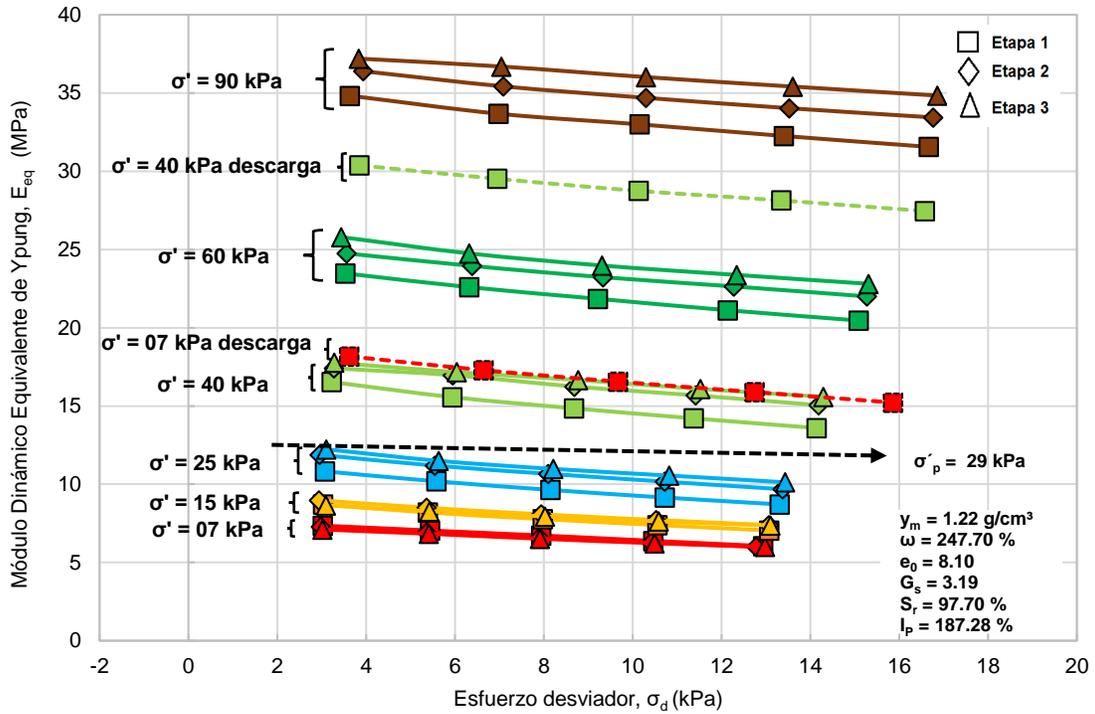


Figura 34. Curva σ_d vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

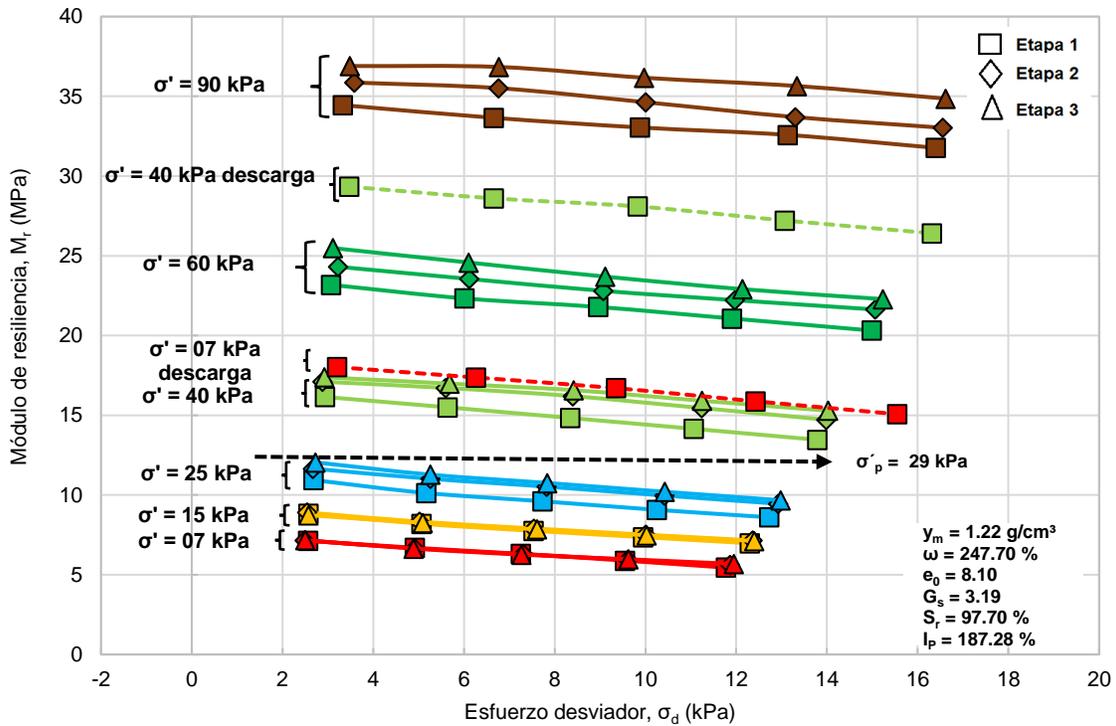


Figura 35. Curva σ_d vs. M_r correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

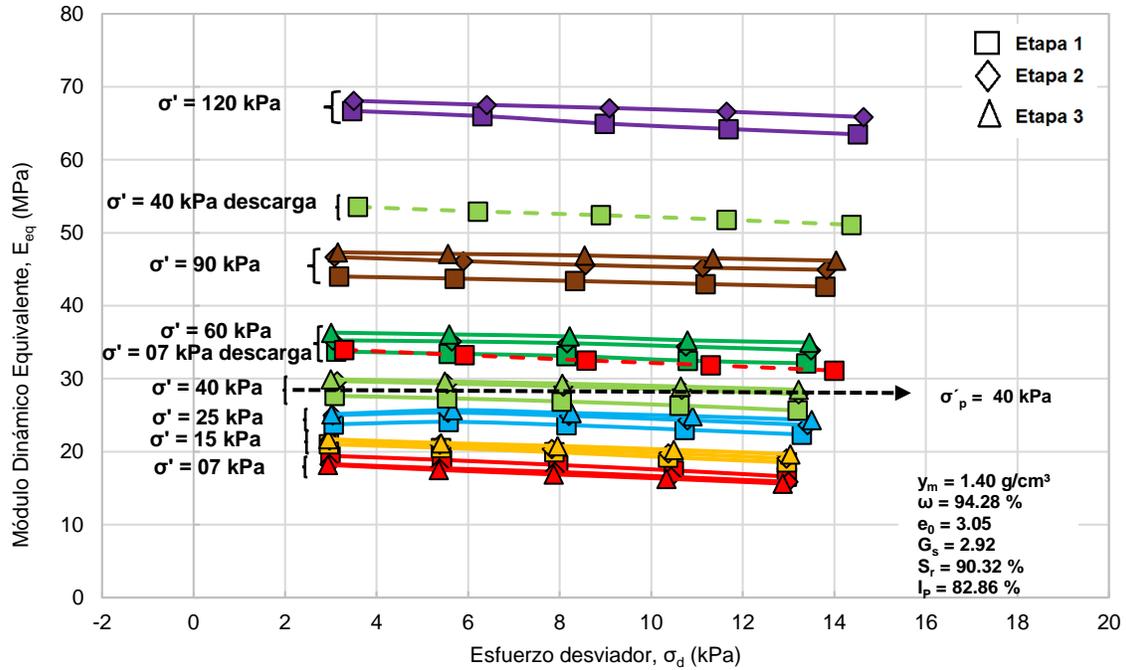


Figura 36. Curva σ_d vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-18 M 3-1
Fuente: elaboración propia.

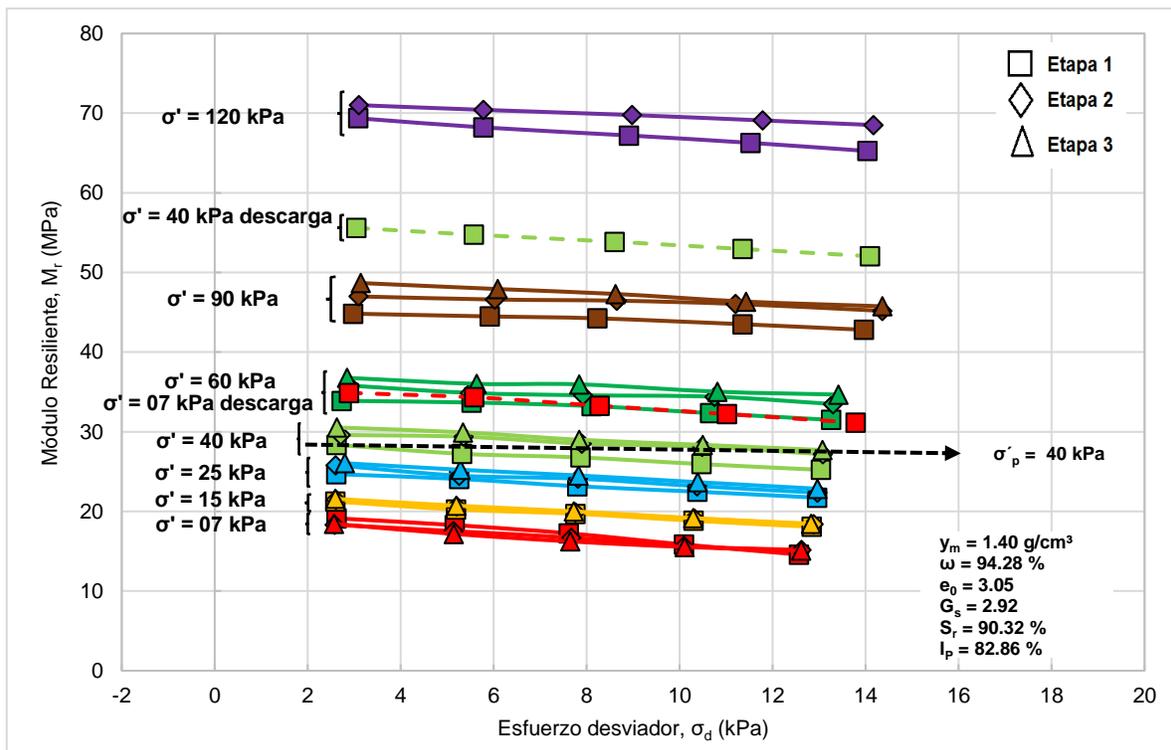


Figura 37. Curva σ_d vs. M_r correspondiente a la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

Influencia de la deformación unitaria axial

Young como el módulo de resiliencia (E_{eq} y M_r) contra la deformación unitaria (ϵ). Los valores de la deformación fueron los obtenidos tras la aplicación de cada uno de los esfuerzos desviadores para cada uno de los incrementos de esfuerzo efectivo utilizados y en sus respectivas etapas de consolidación.

En las Figura 38–Figura 45, se puede apreciar tanto el módulo dinámico equivalente de de

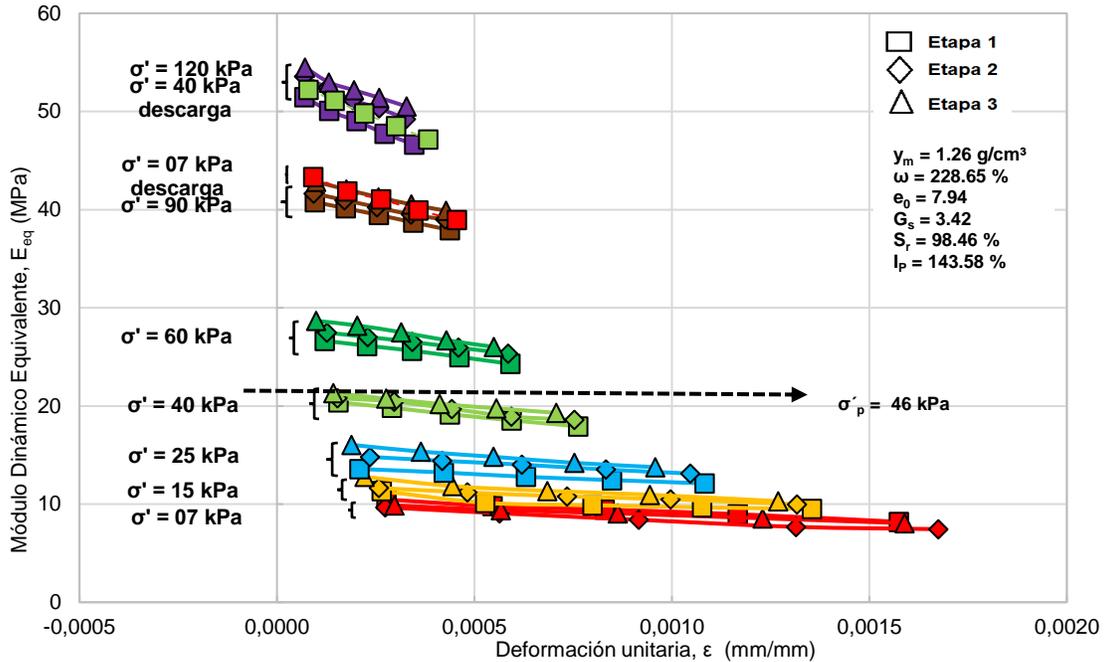


Figura 38. Curva ϵ vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1. Fuente: elaboración propia.

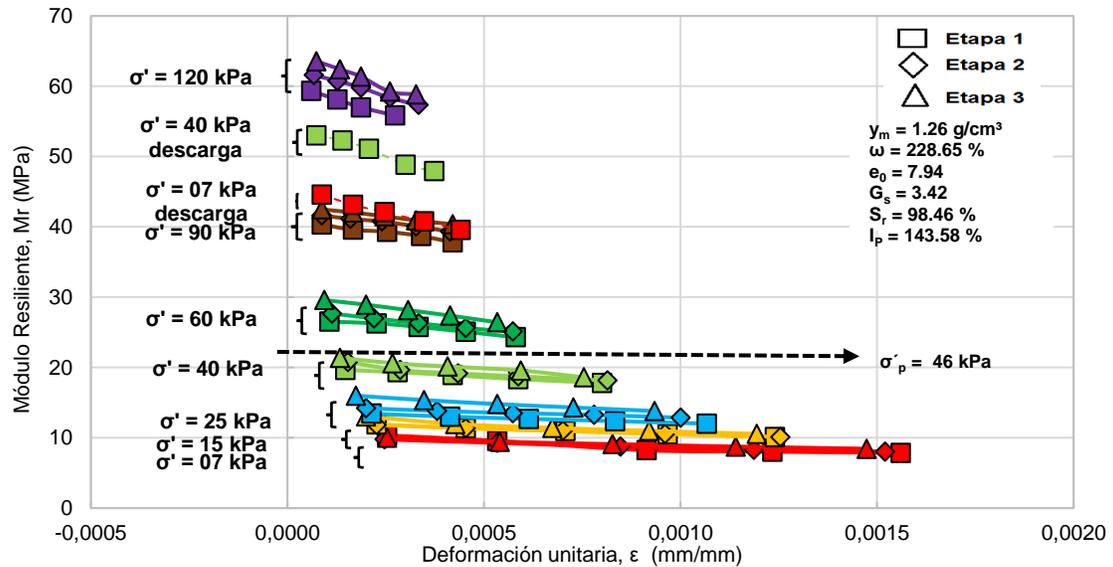


Figura 39. Curva ϵ vs. M_r correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1. Fuente: elaboración propia.

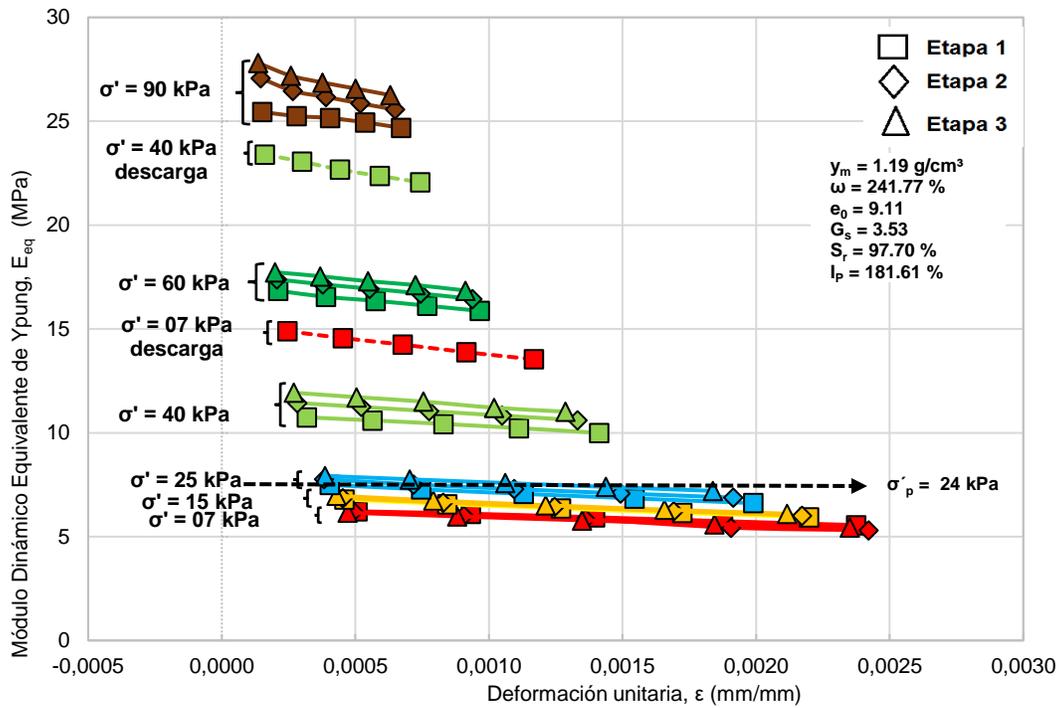


Figura 40. Curva ϵ vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

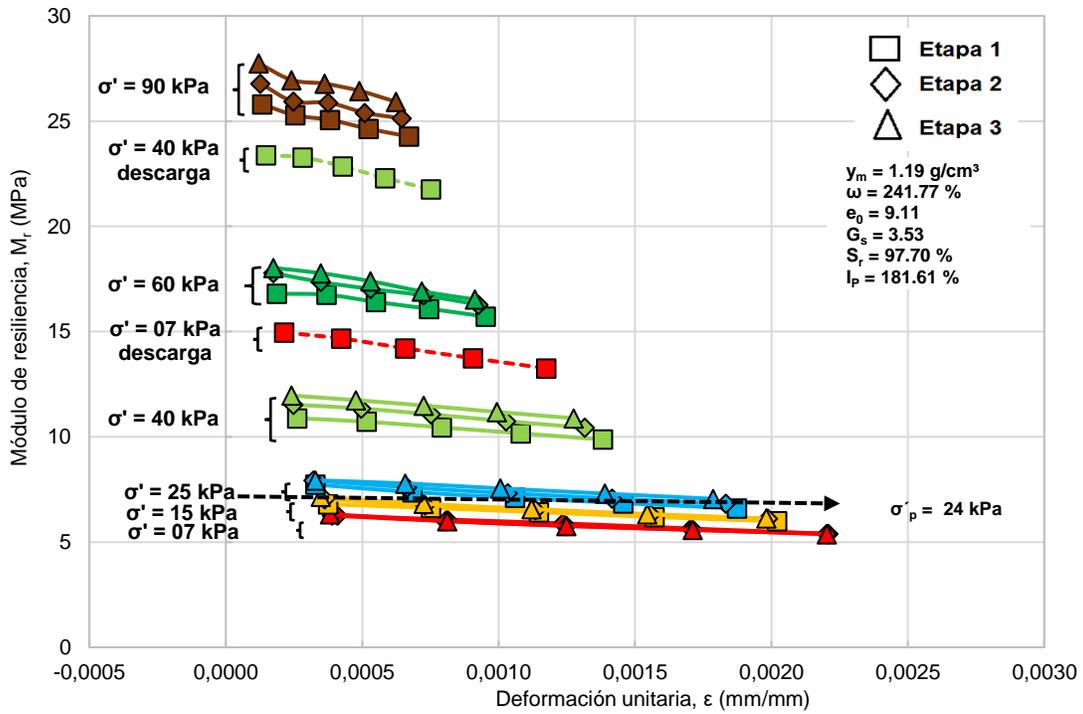


Figura 41. Curva ϵ vs. M_r correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.

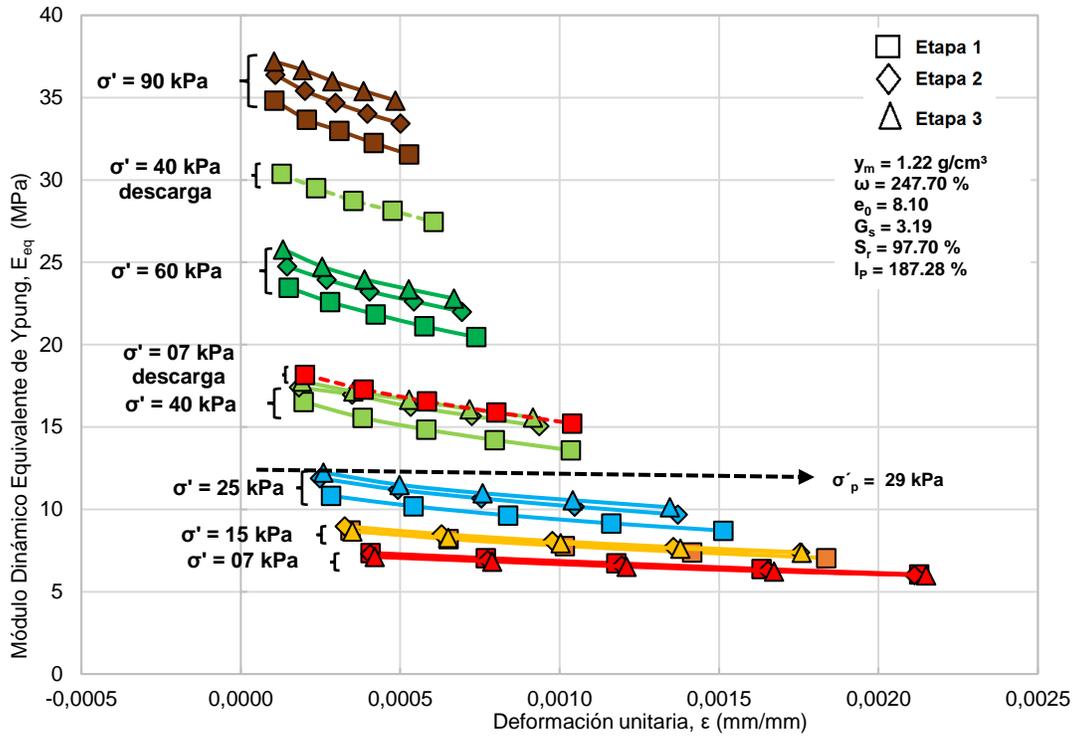


Figura 42. Curva ϵ vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

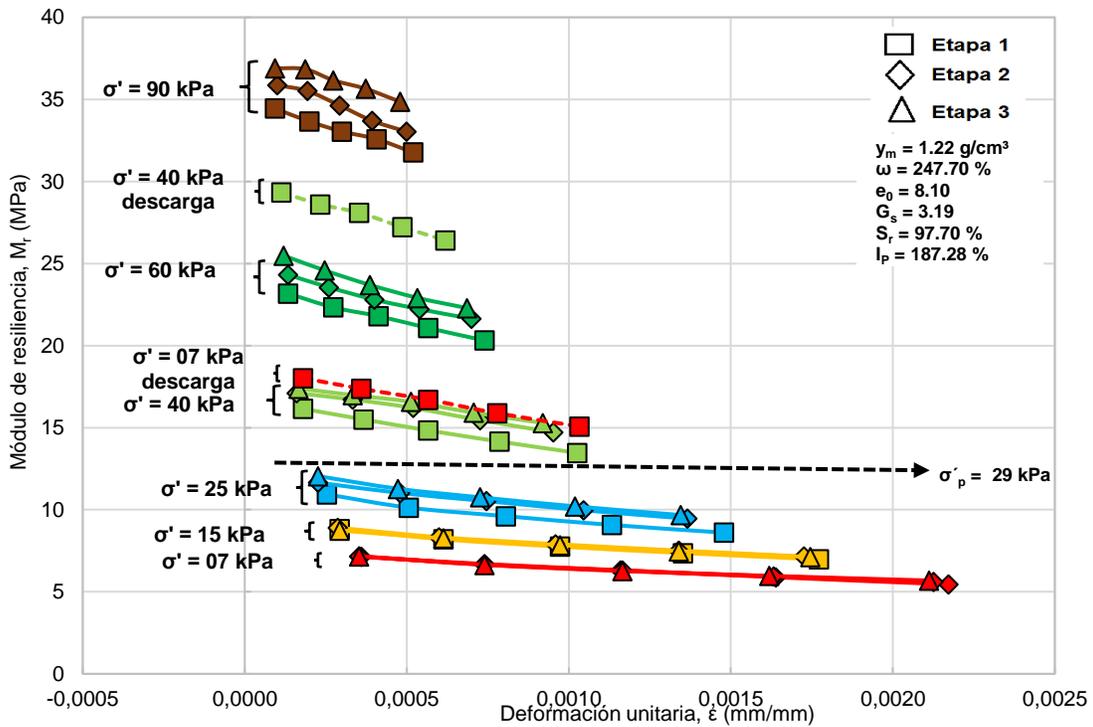


Figura 43. Curva ϵ vs. M_r correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

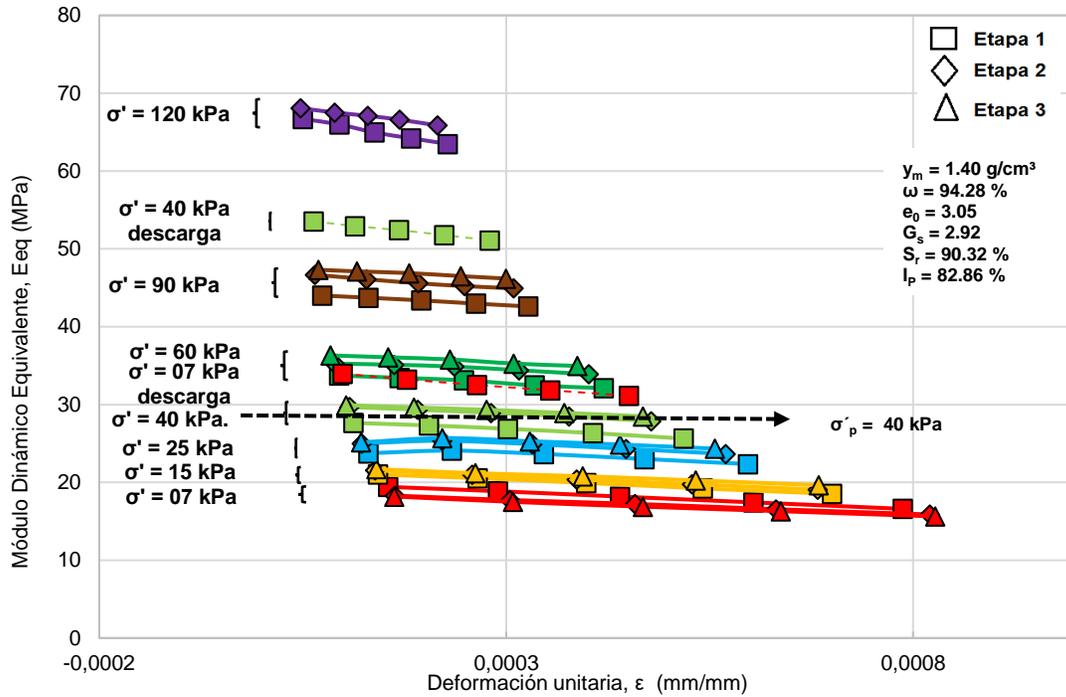


Figura 44. Curva ϵ vs. E_{eq} correspondiente a la muestra SS-18 M 3-1
Fuente: elaboración propia.

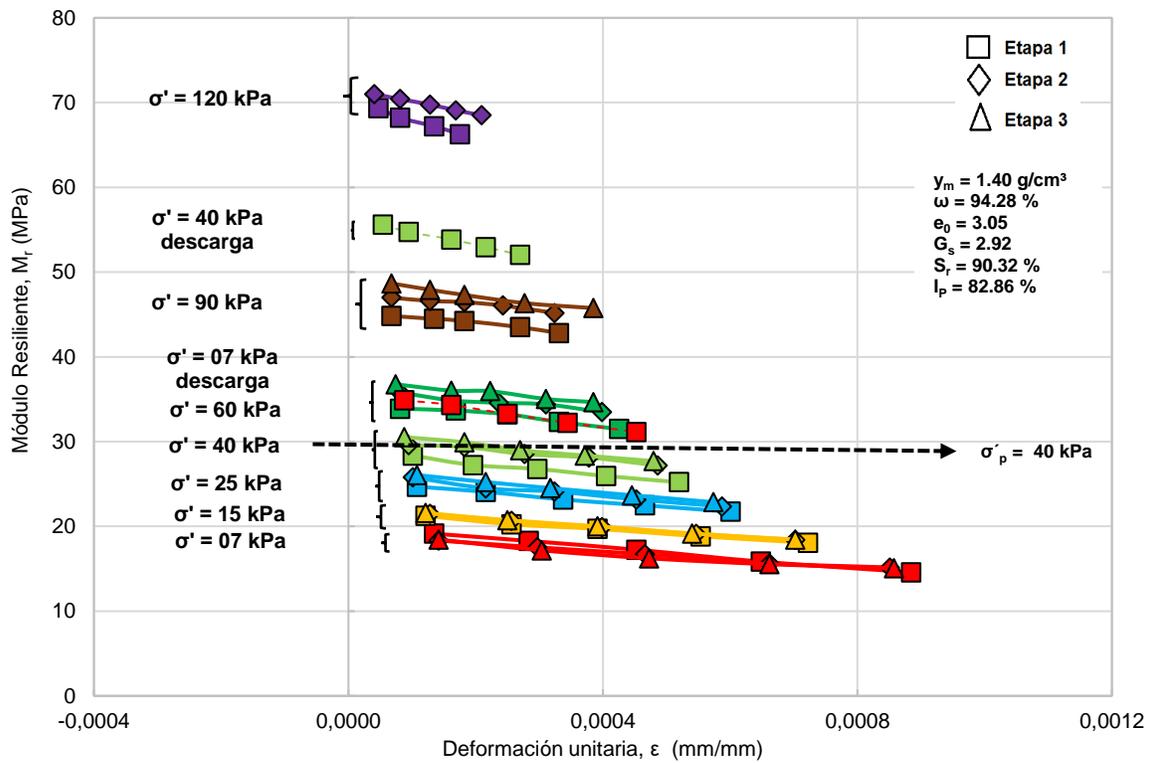


Figura 45. Curva ϵ vs. M_r correspondiente a la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.

Comparativa entre los módulos

obtenidos para todas las probetas ensayadas. De muestran las comparaciones para el tramo de carga en cada una de sus respectivas etapas de consolidación, así como del tramo de descarga.

En las Figura 46–Figura 49, se muestra una comparativa entre los módulos E_{eq} y M_r

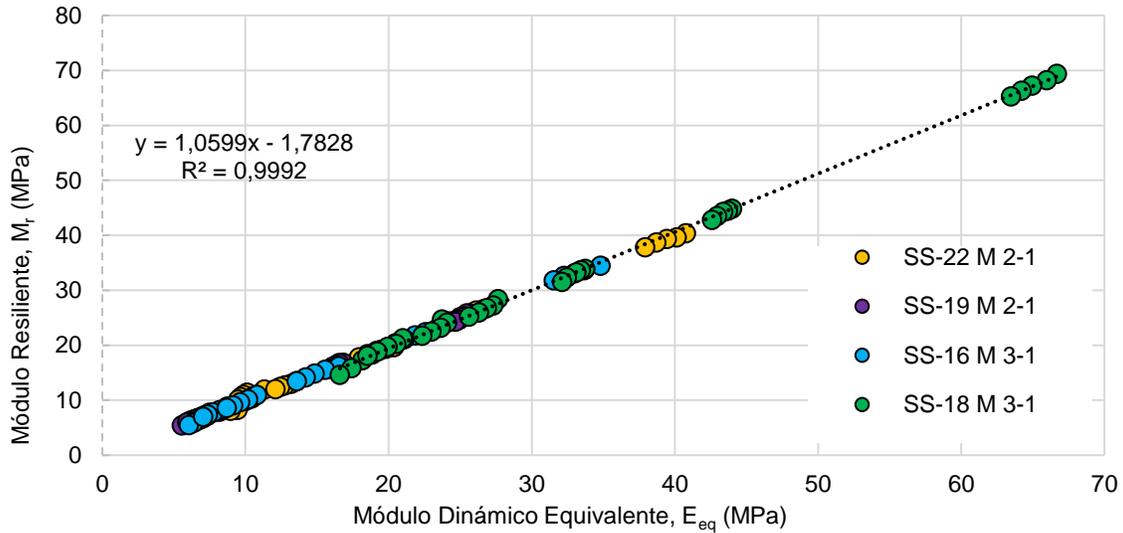


Figura 46. Comparativa de los módulos E_{eq} vs. M_r , correspondiente al tramo de carga de los módulos obtenidos durante la consolidación primaria (etapa 1).
 Fuente: elaboración propia.

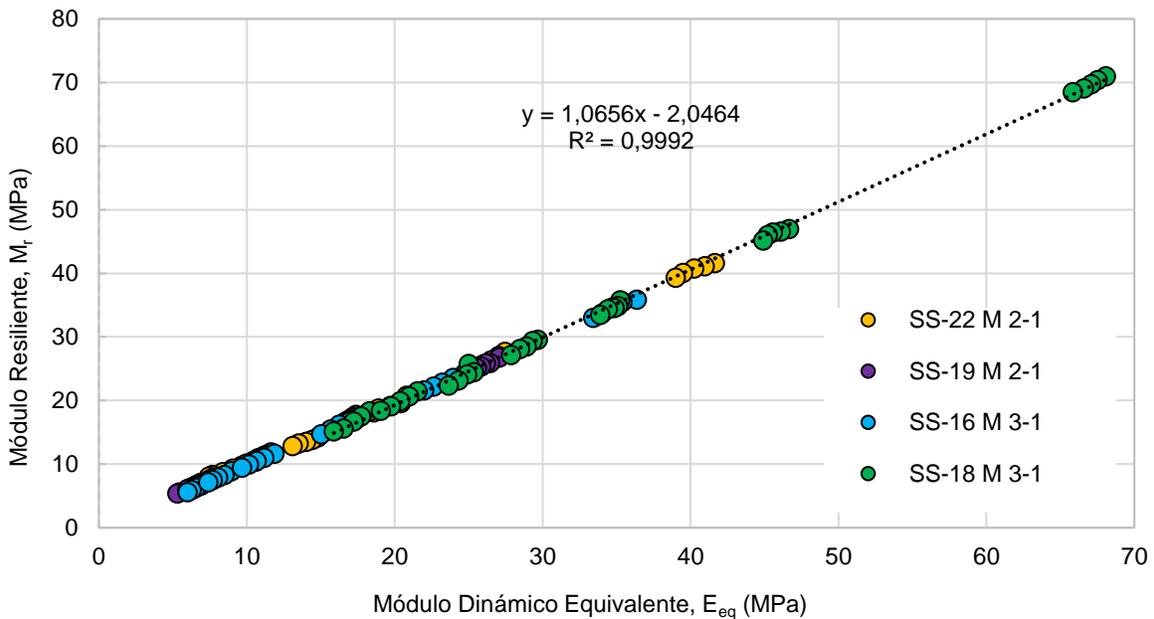


Figura 47. Comparativa de los módulos E_{eq} vs. M_r , correspondiente al tramo de carga de los módulos obtenidos durante la consolidación secundaria (etapa 2).
 Fuente: elaboración propia.

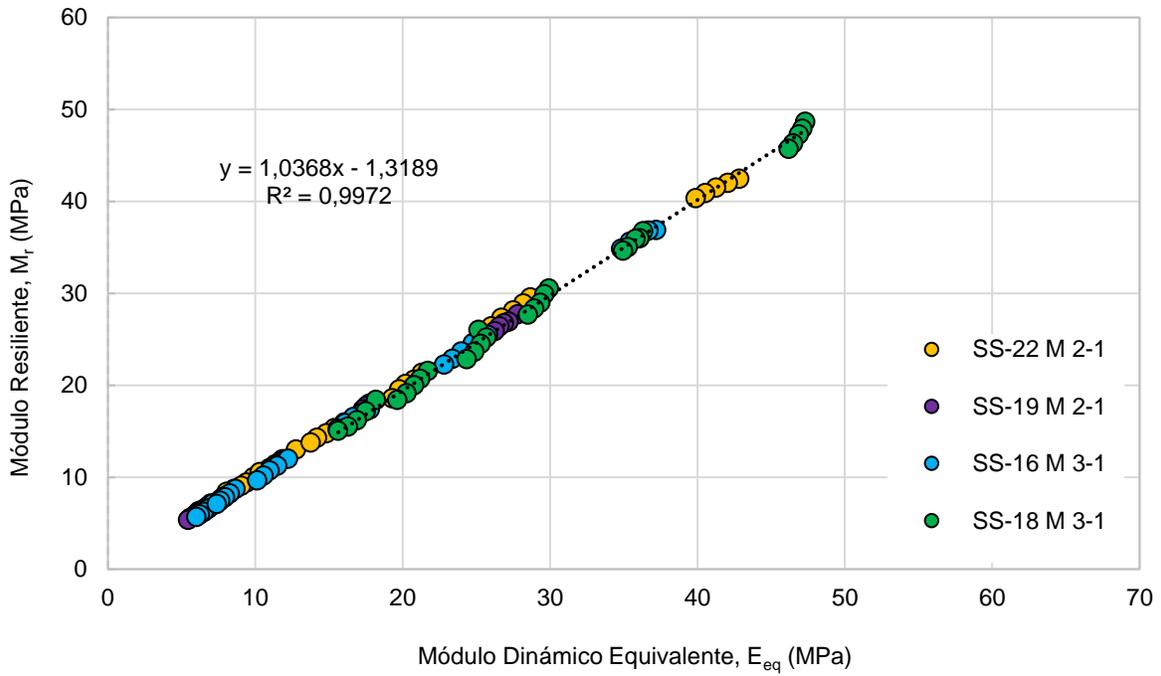


Figura 48. Comparativa de los módulos E_{eq} vs. M_r , correspondiente al tramo de carga de los módulos obtenidos durante la consolidación secundaria (etapa 3).
Fuente: elaboración propia.

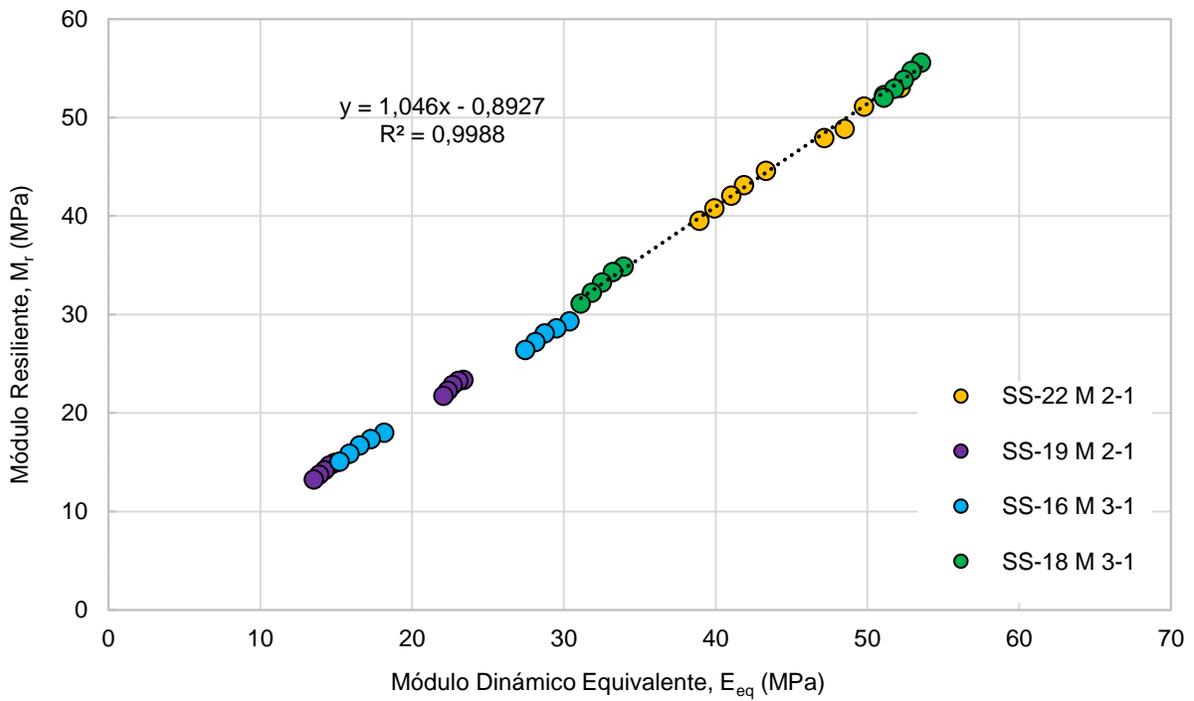


Figura 49. Comparativa de los módulos M_r vs. E_{eq} , correspondiente al tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia.

Relación de vacíos vs. tiempo

En las Figura 50–Figura 57, se aprecia la variación de la relación de vacíos (e) vs. tiempo (t) para los tramos de carga y descarga de las probetas ensayadas. Los valores utilizados para realizar las gráficas de e vs t de

cada uno de los incrementos de esfuerzo efectivo aplicados a las muestras corresponden a los resultados obtenidos para la consolidación primaria y la consolidación secundaria. Es decir, cada curva representa el comportamiento de la muestra durante toda la etapa de consolidación para cada esfuerzo efectivo aplicado.

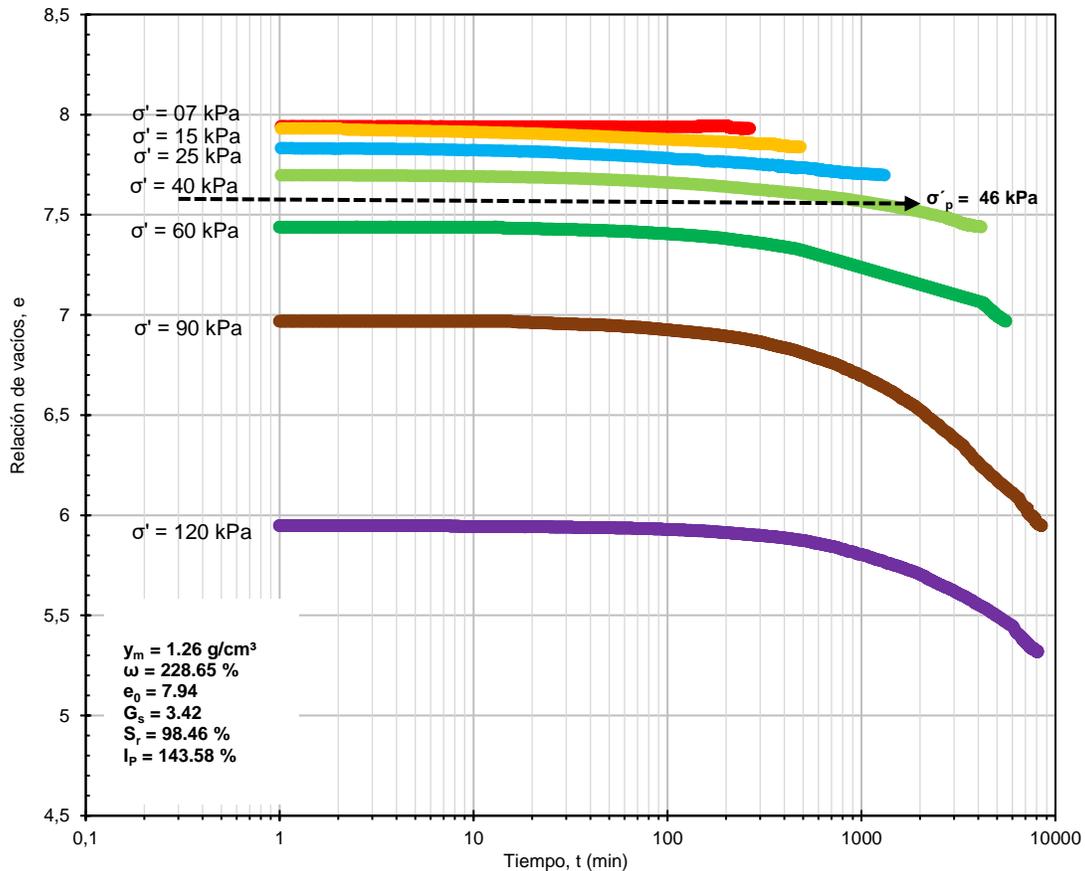


Figura 50. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia.

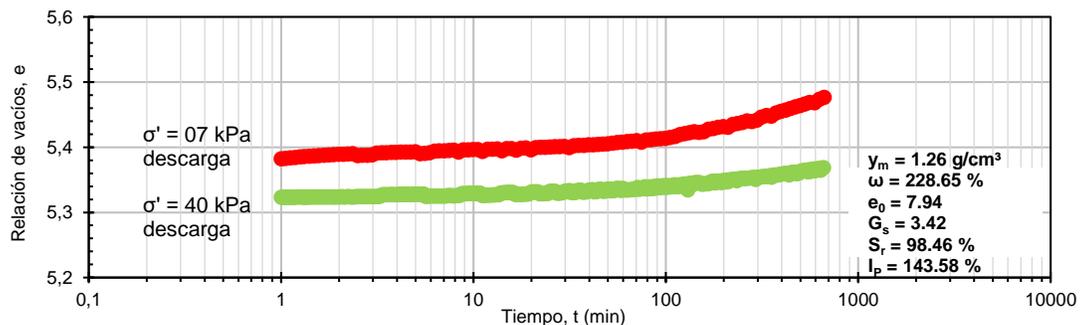


Figura 51. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia.

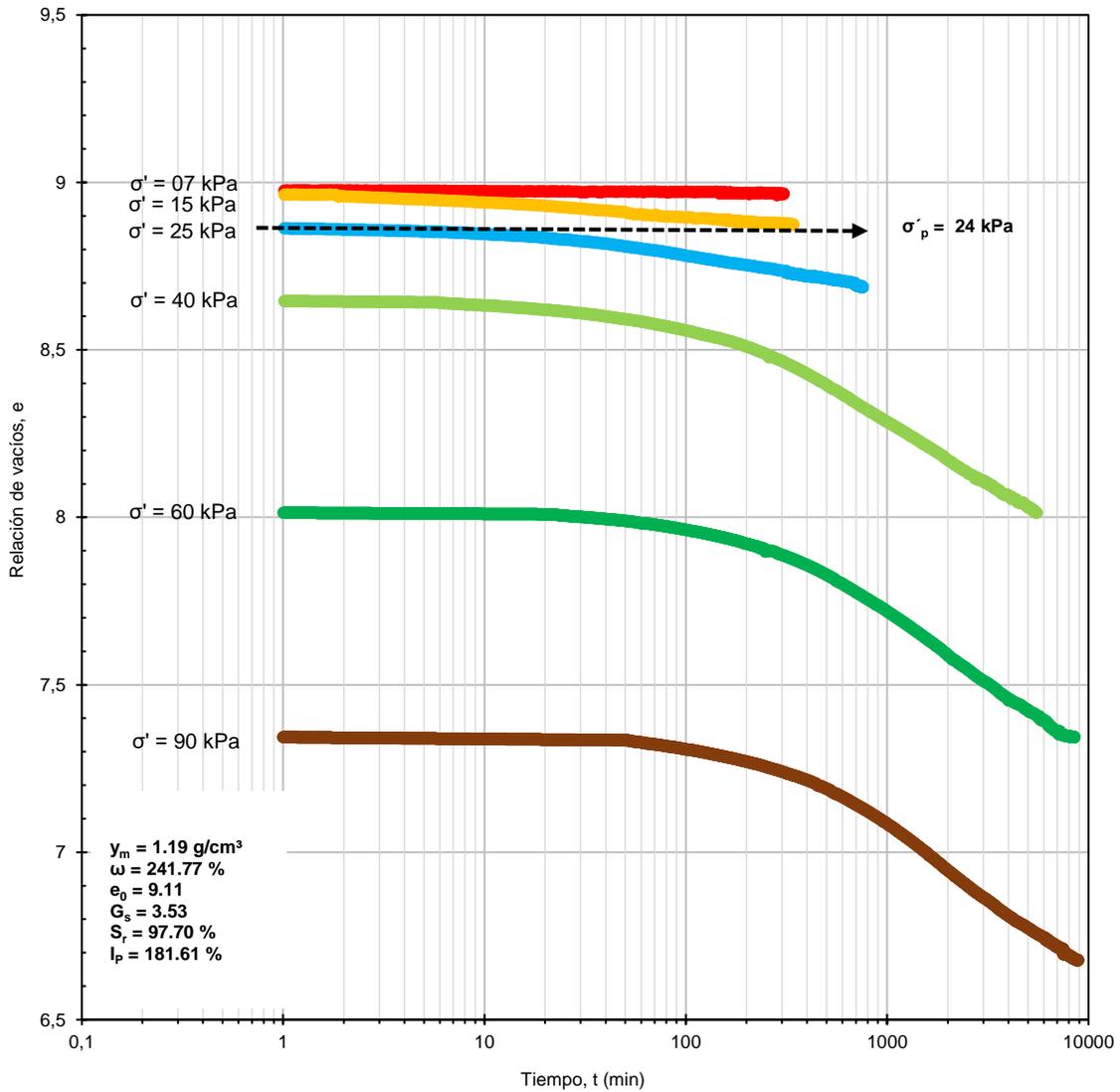


Figura 52. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia.

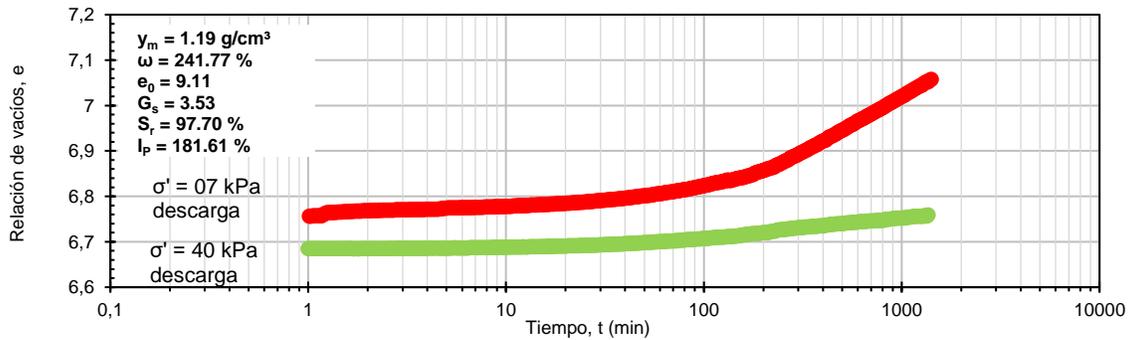


Figura 53. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia.

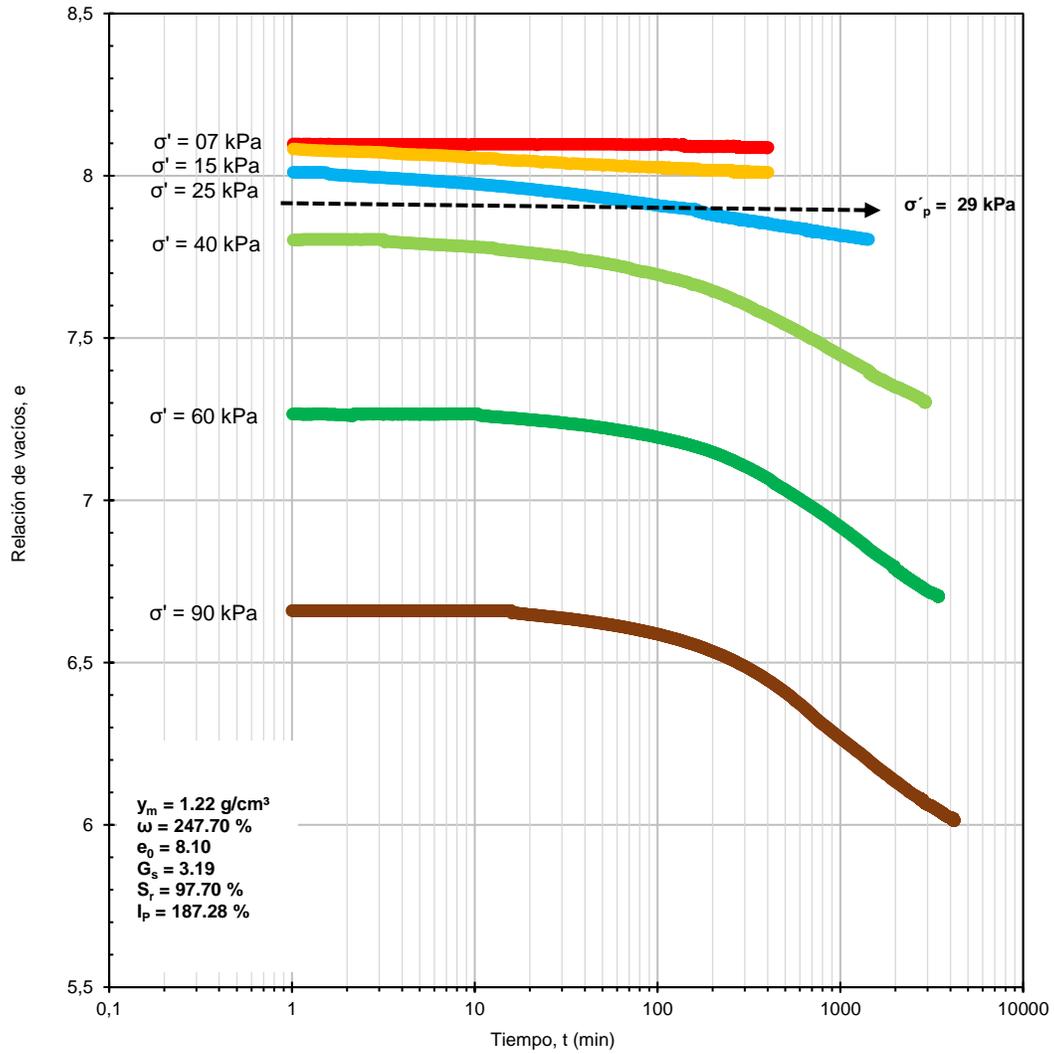


Figura 54. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia.

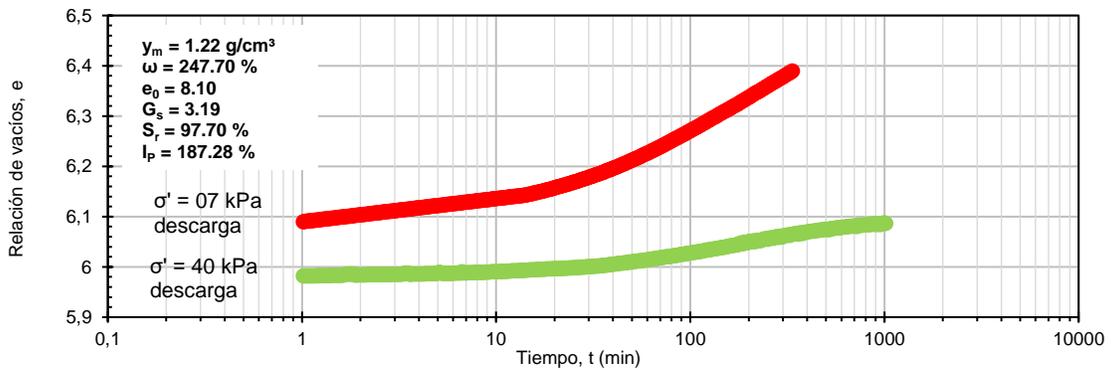


Figura 55. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia.

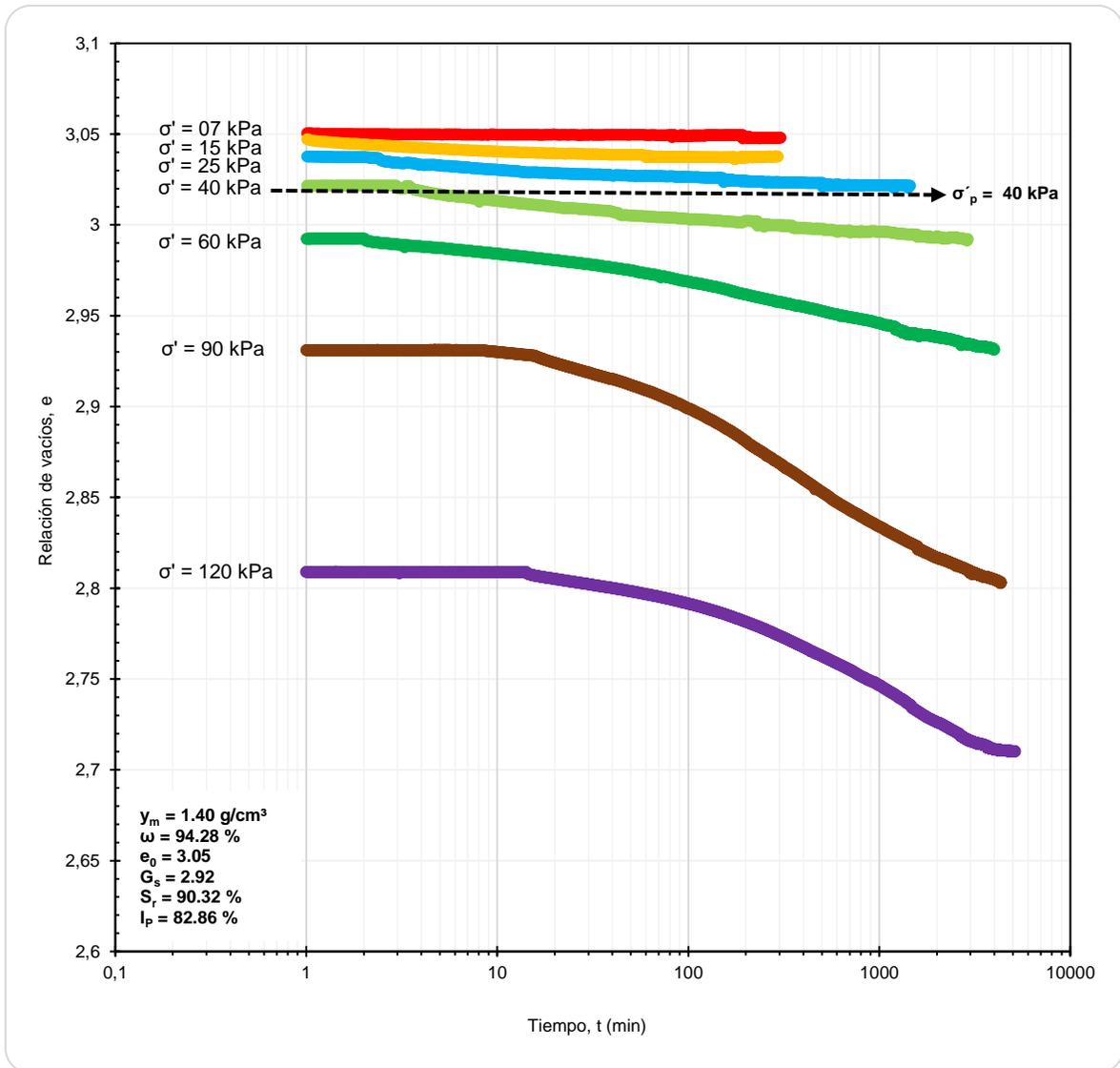


Figura 56. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-18 M 2-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia.

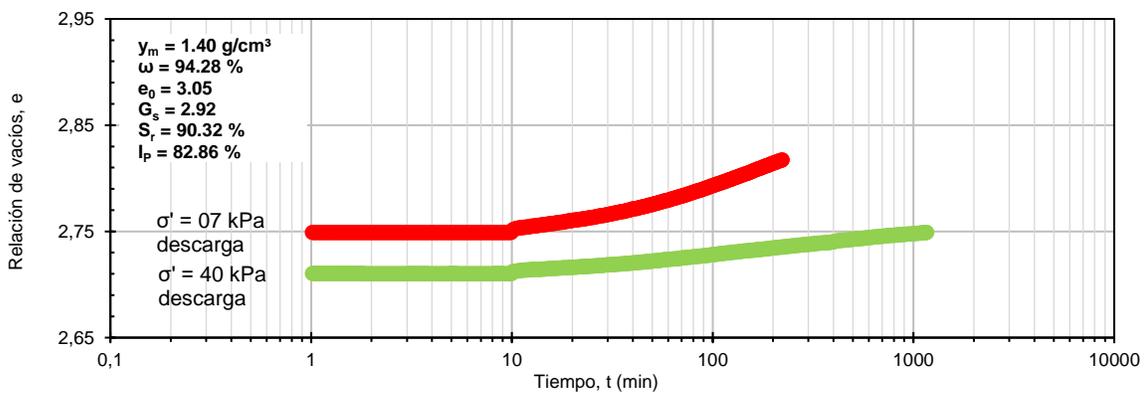


Figura 57. Curva t vs. e correspondiente a la muestra SS-18 M 2-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia.

Disipación del exceso de presión de poro

En las Figura 58–Figura 66, se presentan las curvas en las que se pueden observar la disipación del exceso de presión de poro (μ) y la relación de vacíos (e) generado en cada uno de los incrementos de esfuerzos efectivos utilizados, ambas variables respecto al tiempo de consolidación, tanto para el tramo de carga como para el tramo de descarga de la muestra SS-18 M 3-1. Solo se presentan los resultados para dicha muestra, puesto que interesa mostrar el comportamiento general de la disipación del exceso de presión de poro y la relación de vacíos respecto al tiempo de consolidación. Los resultados para las demás muestras se encuentran en el

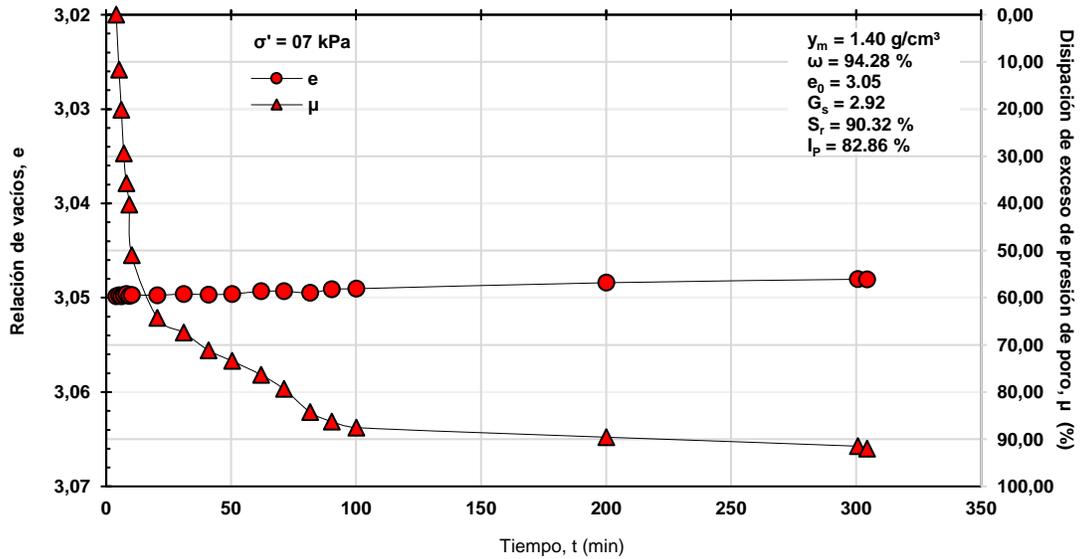
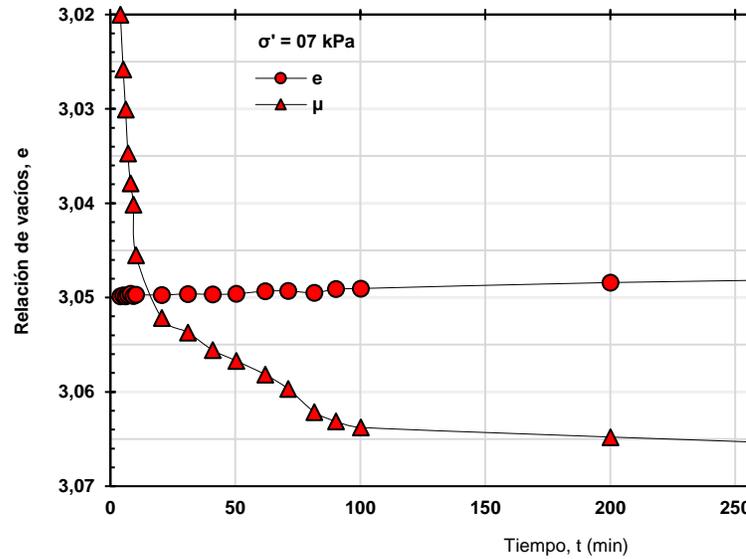


Figura 58. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.

Fuente: elaboración propia.

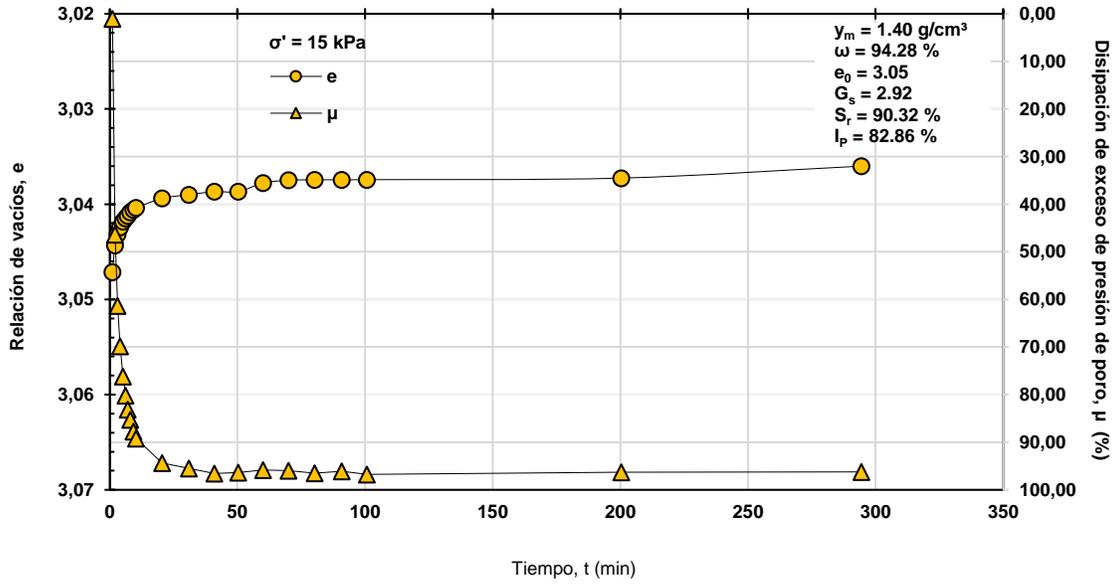


Figura 59. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 15 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

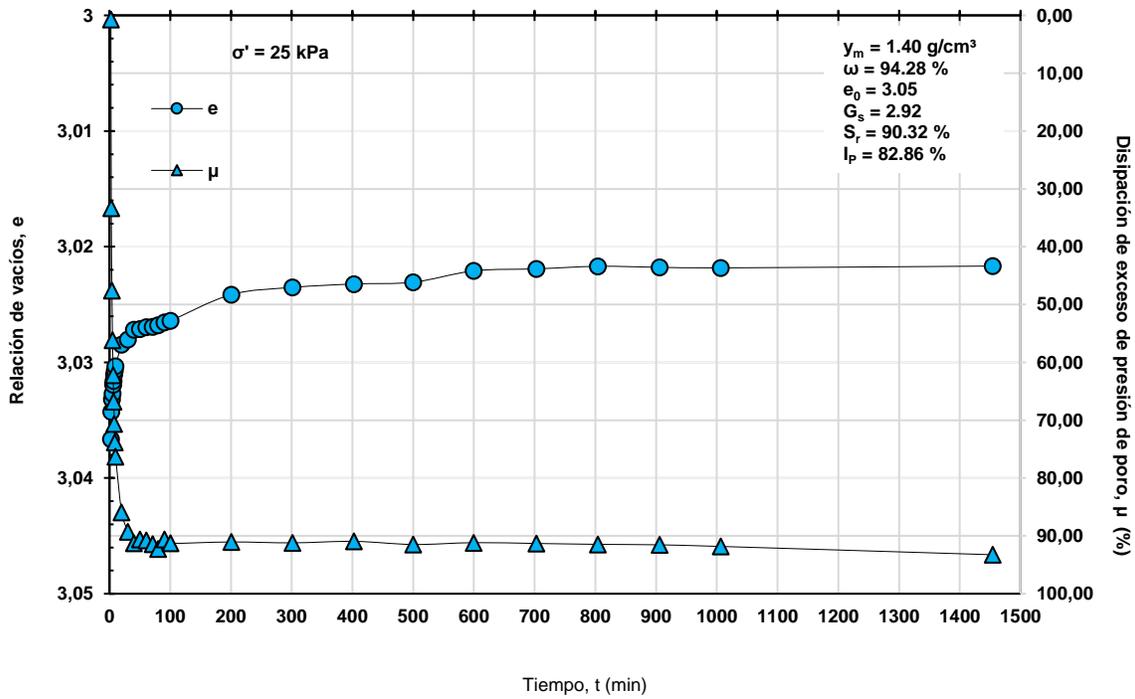


Figura 60. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 25 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

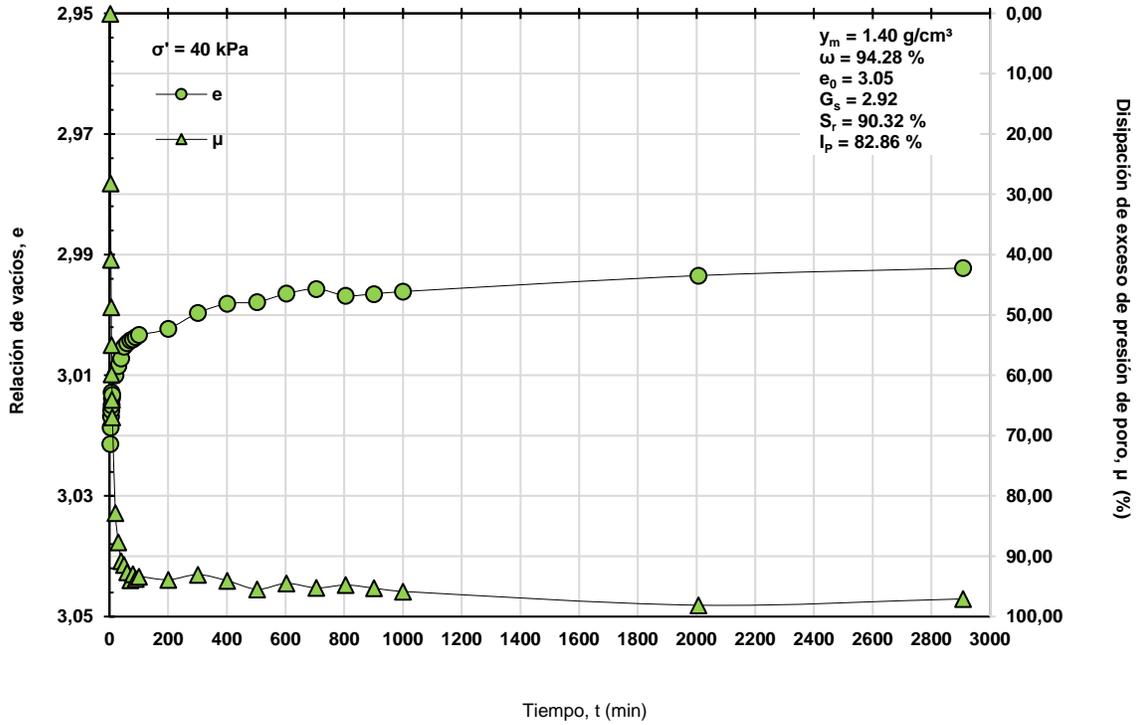


Figura 61. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

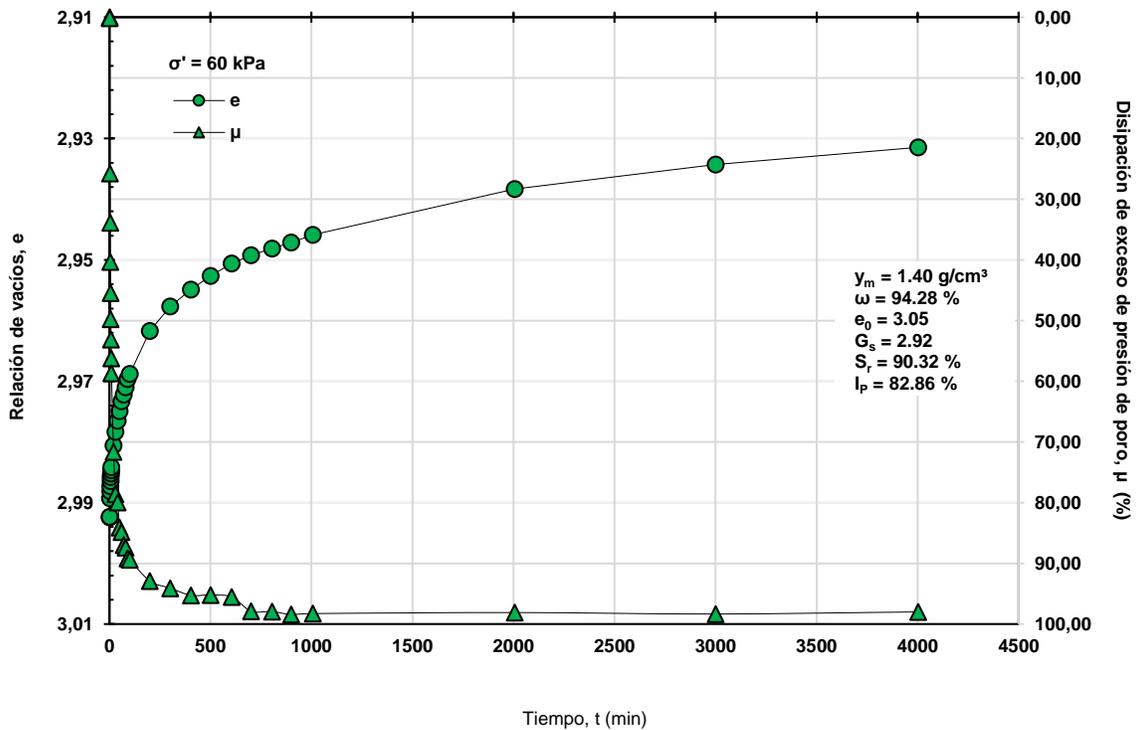


Figura 62. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 60 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

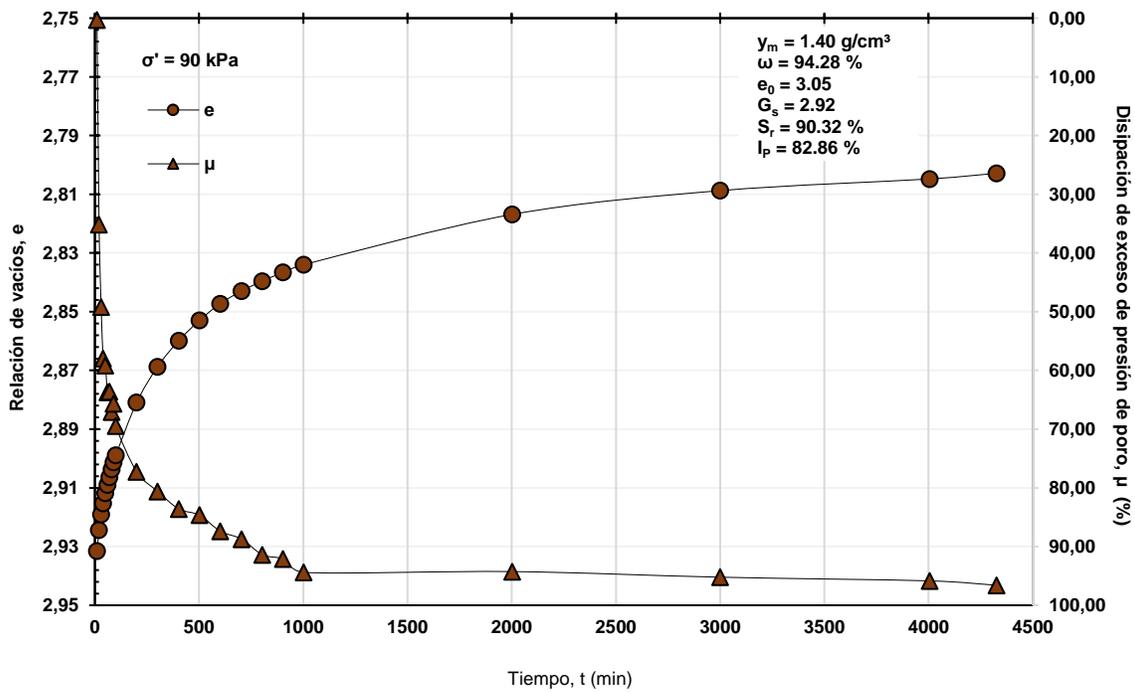


Figura 63. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 90 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.

Fuente: elaboración propia

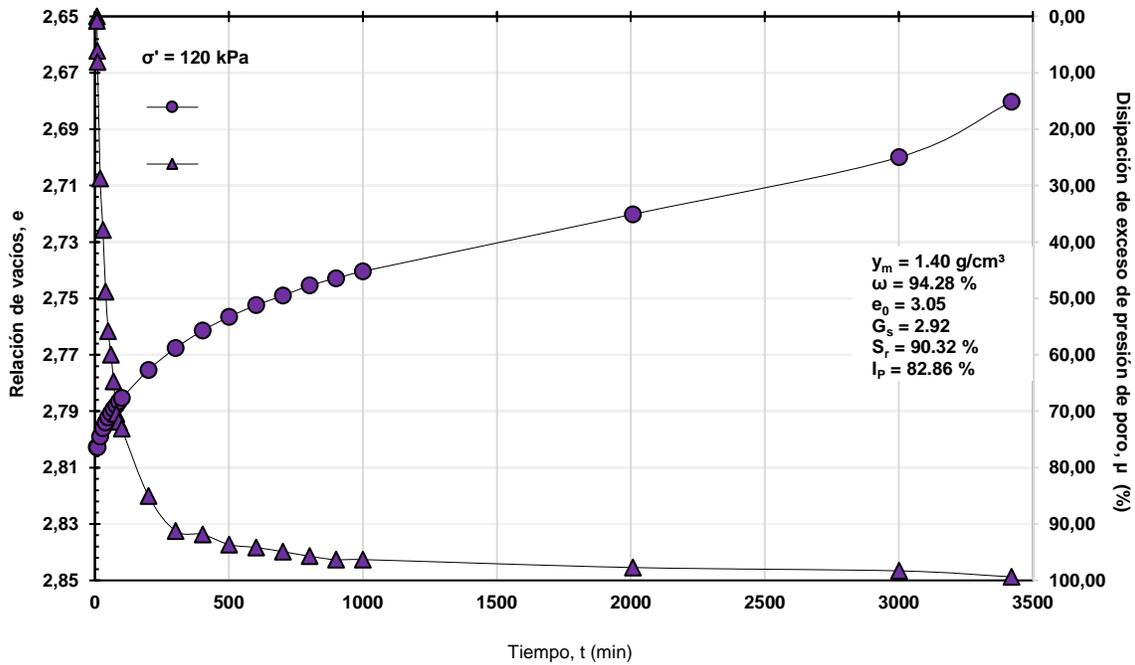


Figura 64. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 120 kPa del tramo de carga de la muestra SS-18 M 3-1.

Fuente: elaboración propia

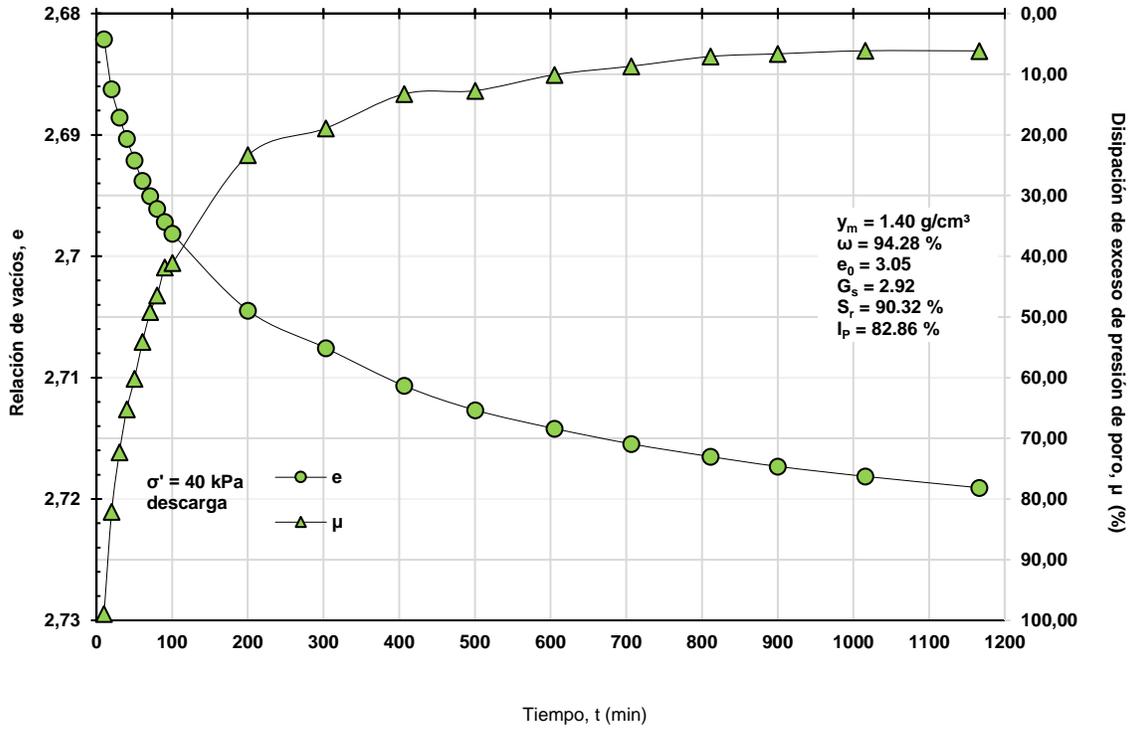


Figura 65. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

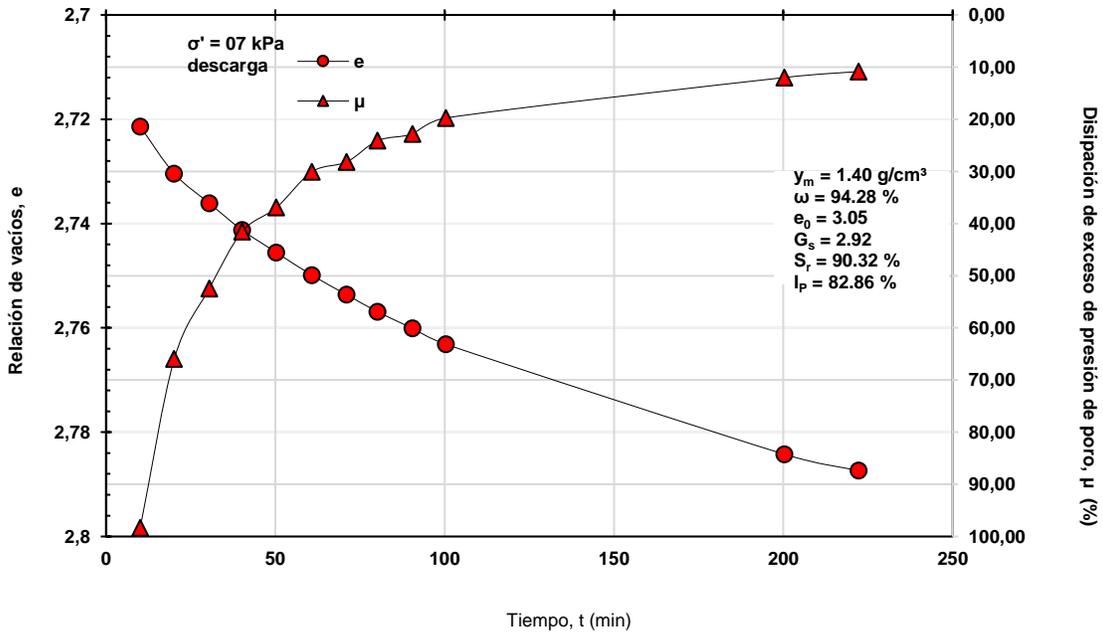


Figura 66. Curva t vs. e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

Influencia del índice de plasticidad

En las Figura 67–Figura 82, se muestran las curvas resultantes al graficar los valores de los índices de plasticidad (I_p) de cada una de las

muestras vs. los valores de los módulos (E_{eq} y M_r); esto con la intención de mostrar el comportamiento de los módulos respecto al valor del índice de plasticidad de cada una de las muestras.

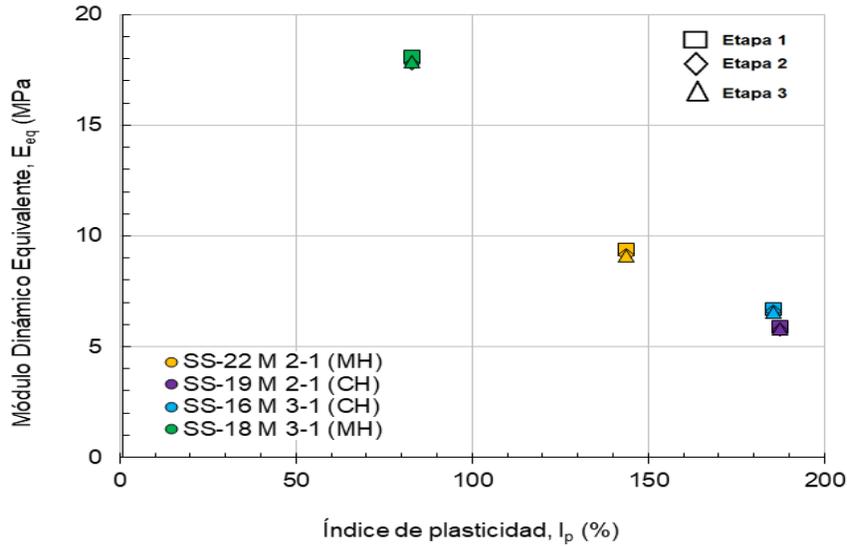


Figura 67. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 07 kPa. Fuente: elaboración propia

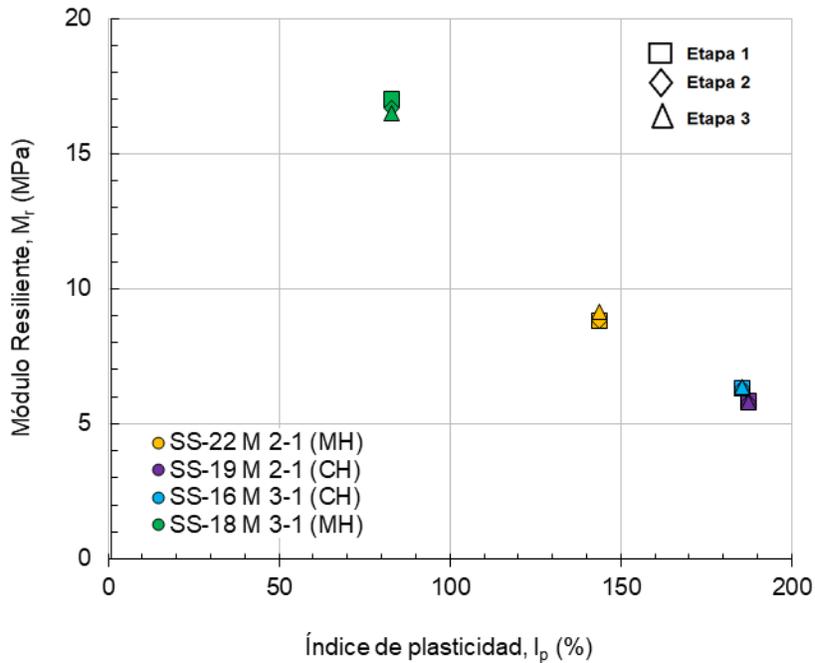


Figura 68. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 07 kPa. Fuente: elaboración propia

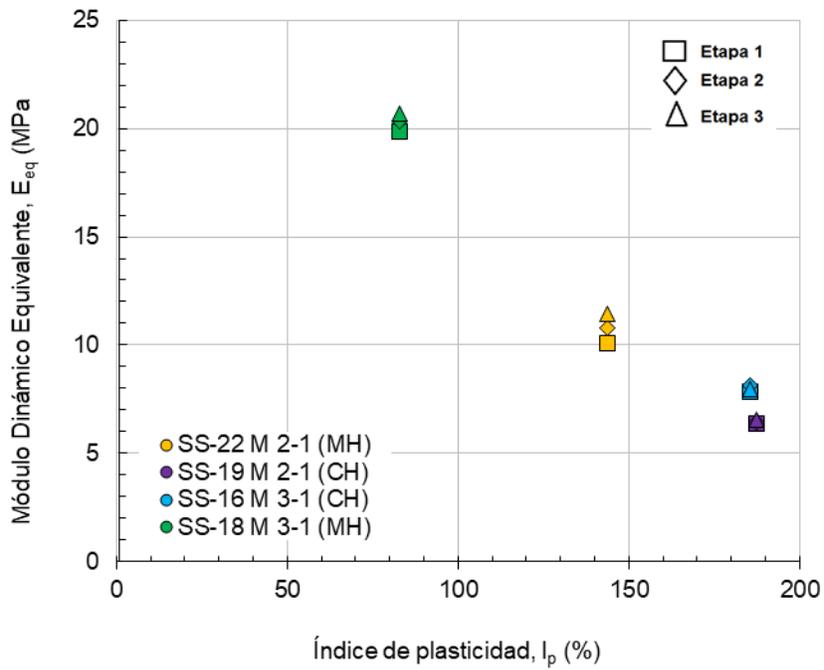


Figura 69. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 15 kPa.
Fuente: elaboración propia

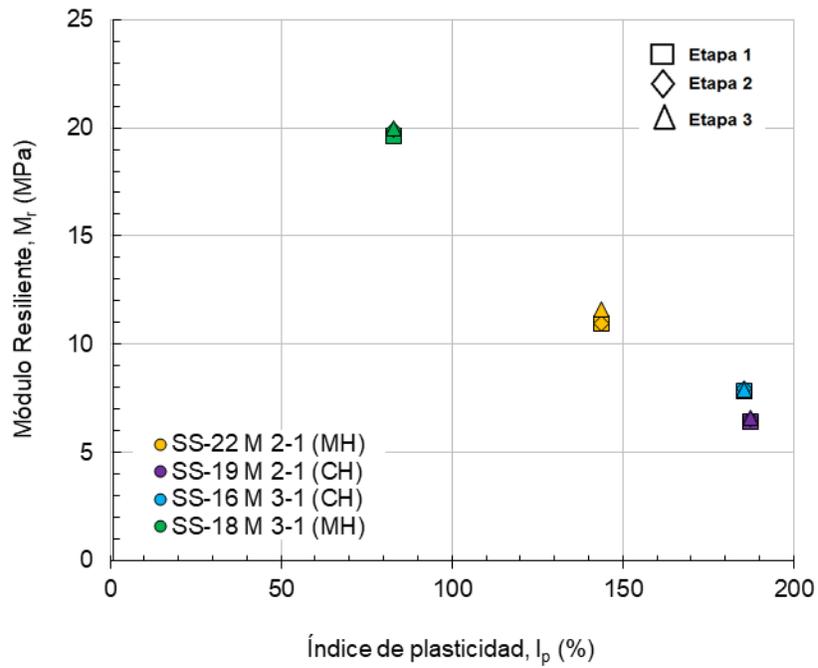


Figura 70. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 15 kPa.
Fuente: elaboración propia

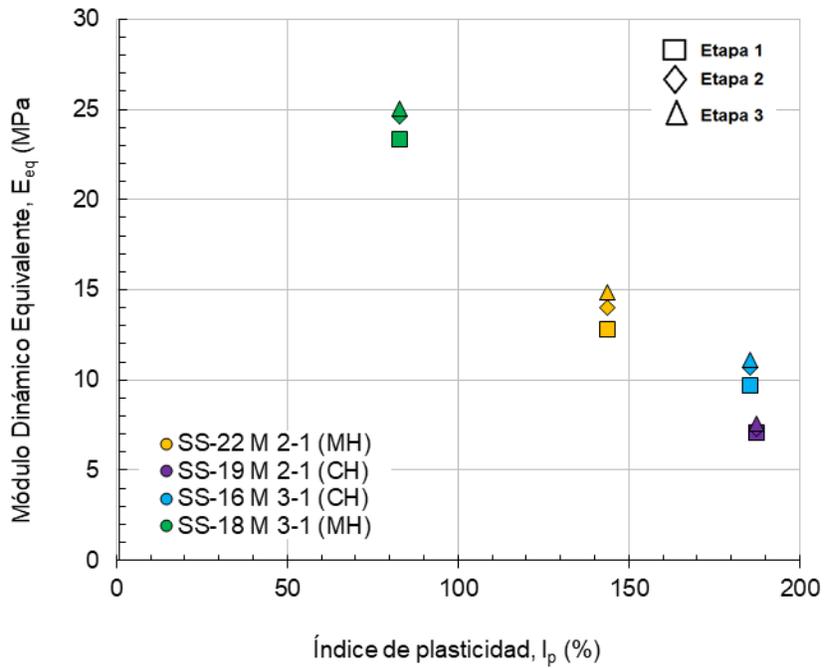


Figura 71. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 25 kPa.
Fuente: elaboración propia

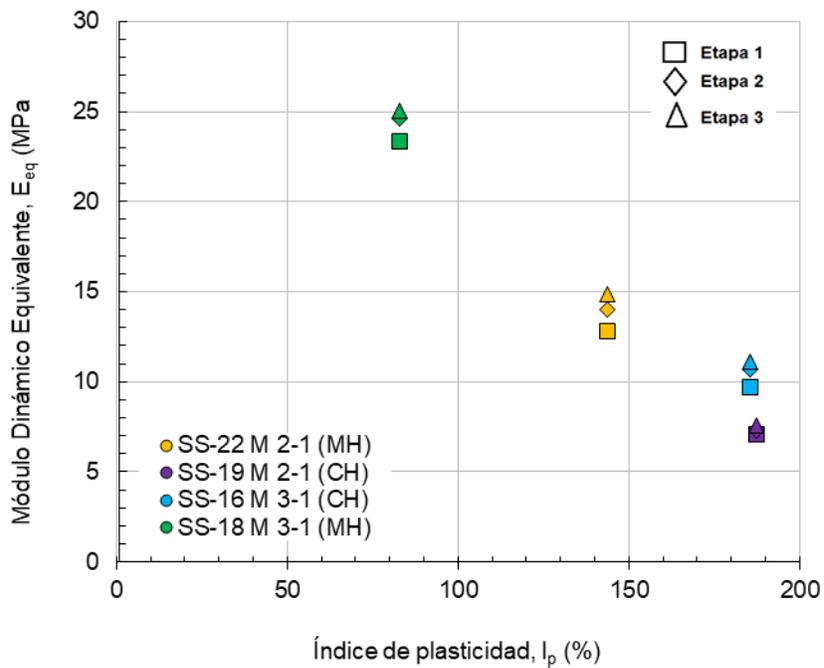


Figura 72. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 25 kPa.
Fuente: elaboración propia

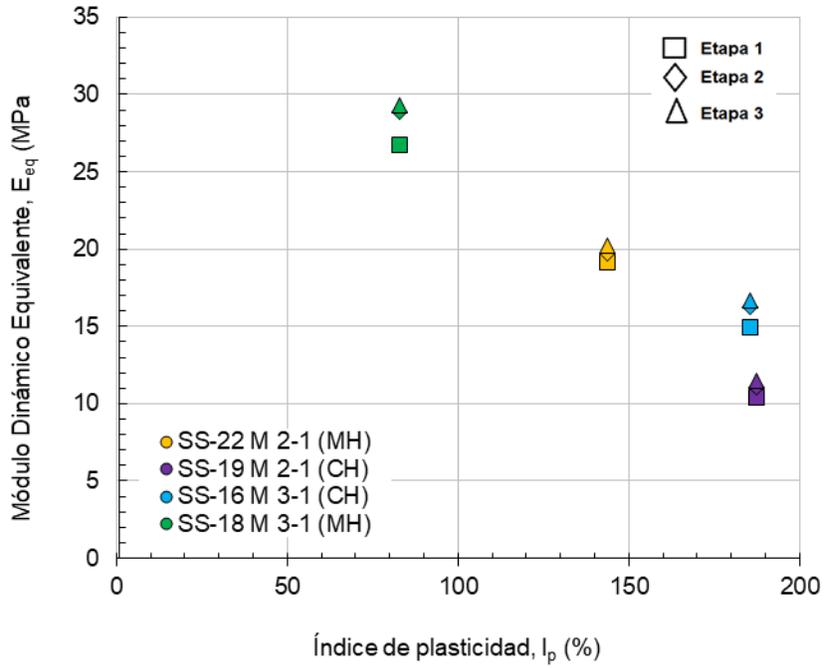


Figura 73. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 40 kPa.
Fuente: elaboración propia

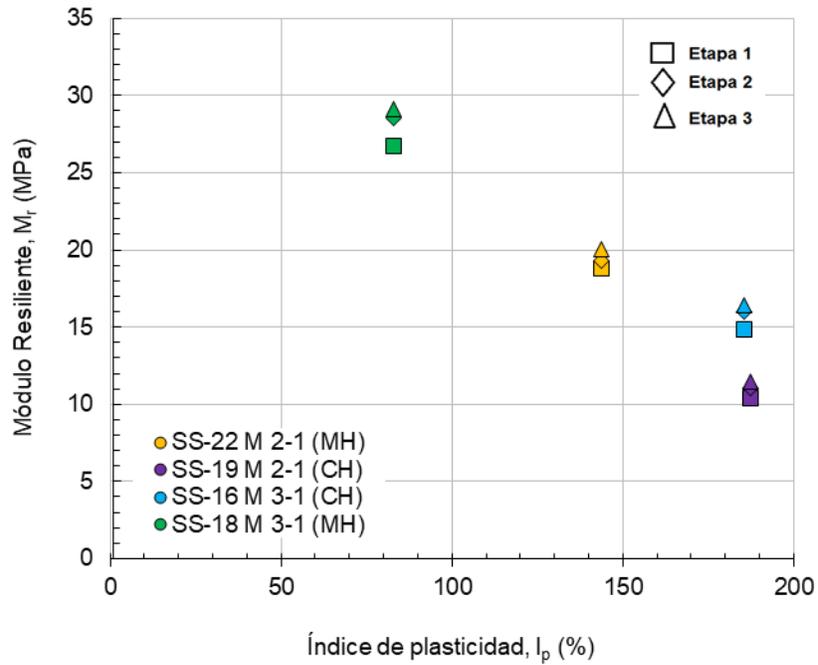


Figura 74. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 40 kPa.
Fuente: elaboración propia

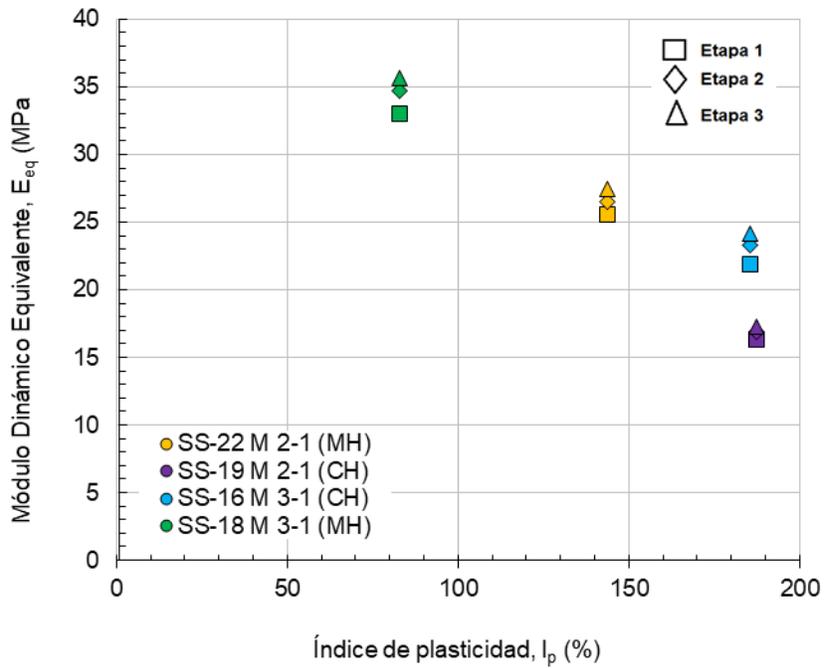


Figura 75. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 60 kPa.
Fuente: elaboración propia

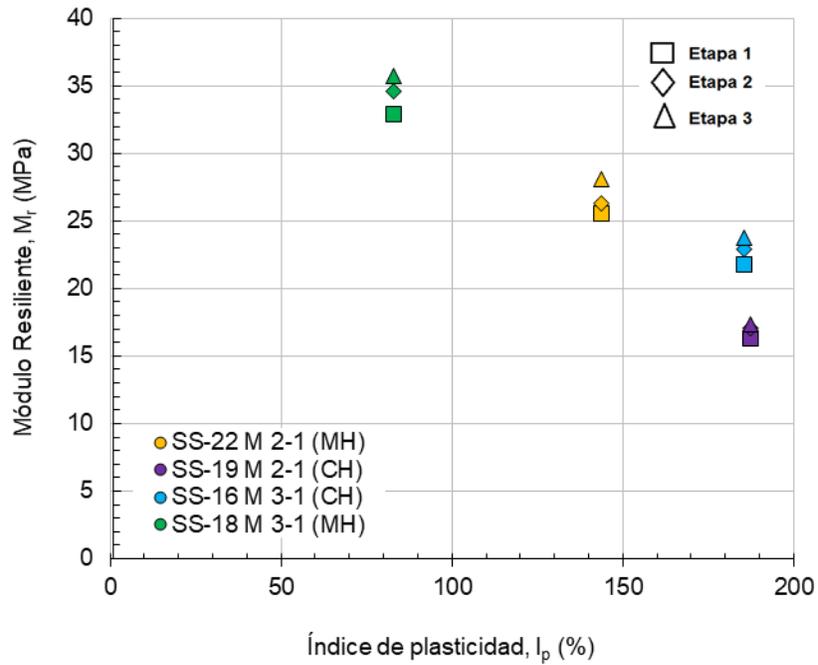


Figura 76. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 60 kPa.
Fuente: elaboración propia

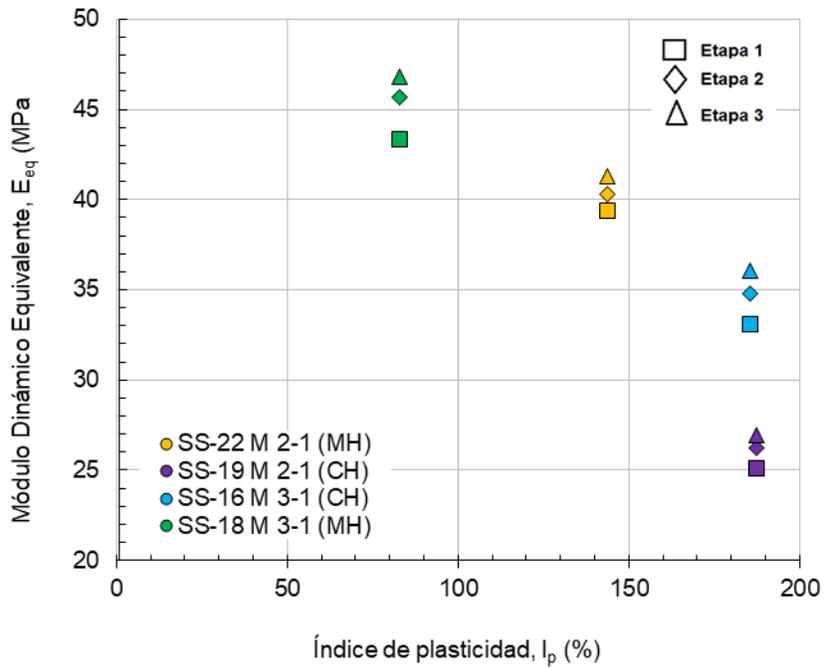


Figura 77. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 90 kPa.
Fuente: elaboración propia

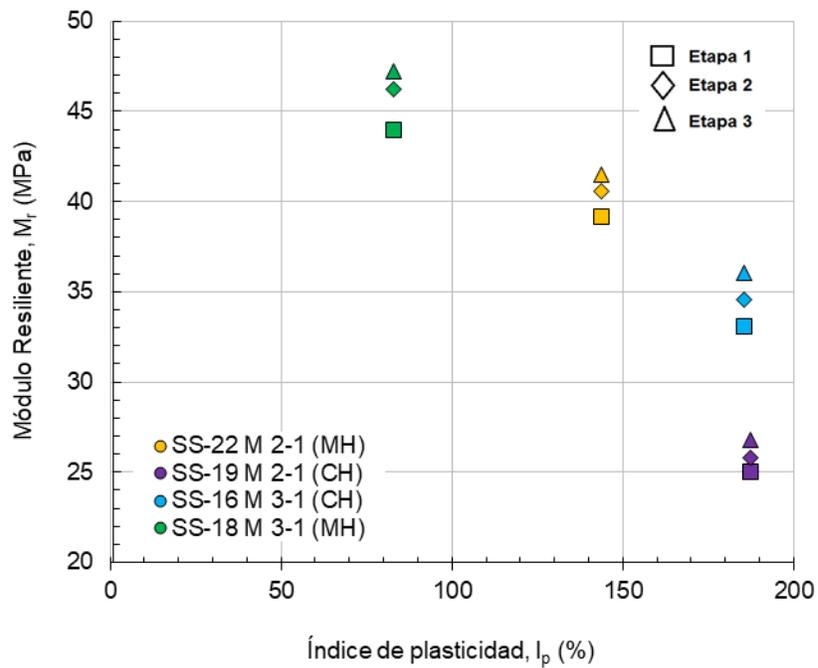


Figura 78. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 90 kPa.

Fuente: elaboración propia

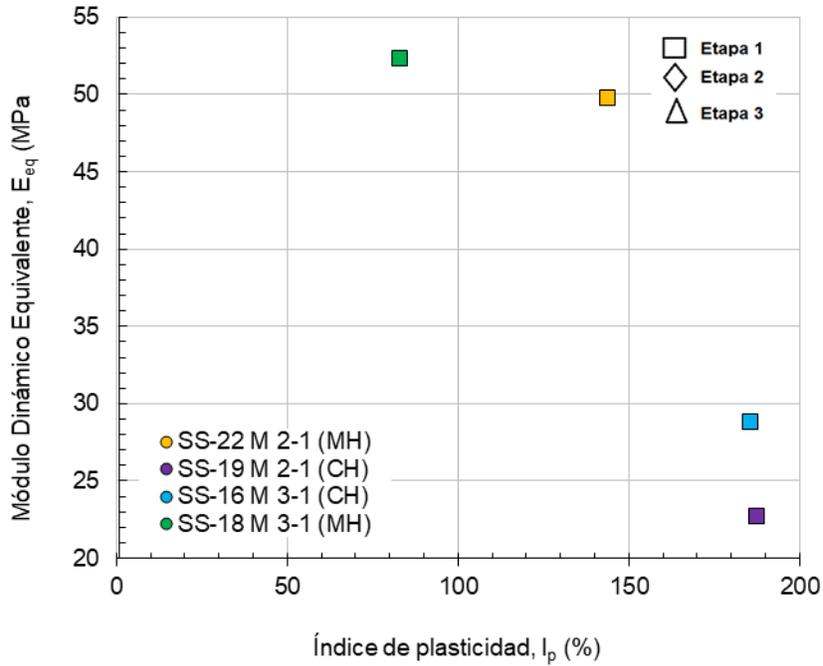


Figura 79. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 40 kPa descarga.
Fuente: elaboración propia

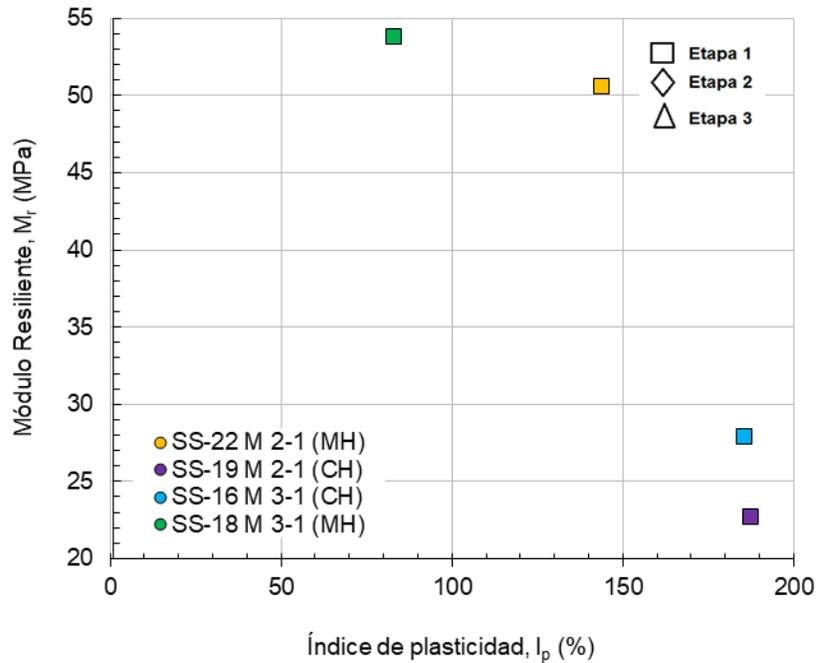


Figura 80. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 40 kPa descarga.
Fuente: elaboración propia

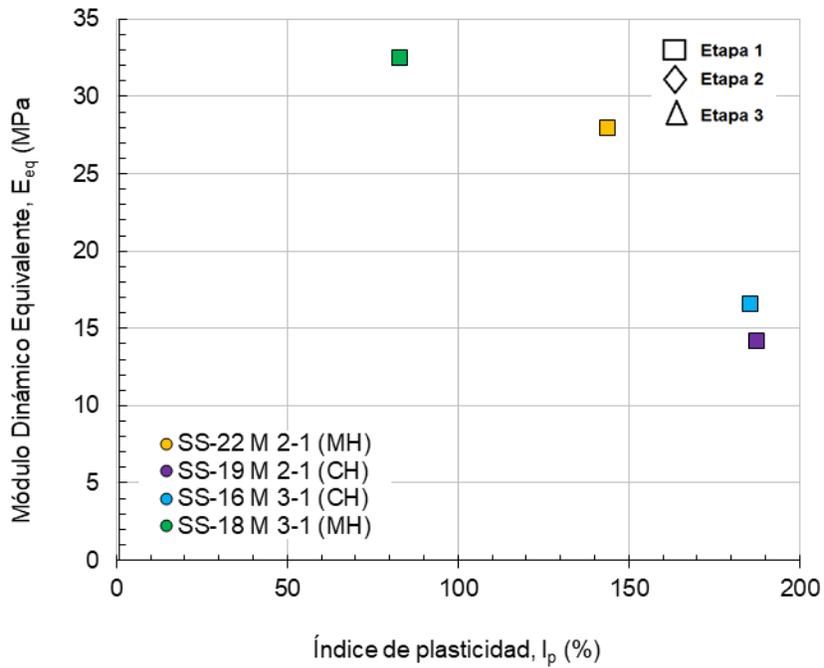


Figura 81. Curva I_p vs. E_{eq} correspondientes al esfuerzo efectivo de 07 kPa descarga.
Fuente: elaboración propia

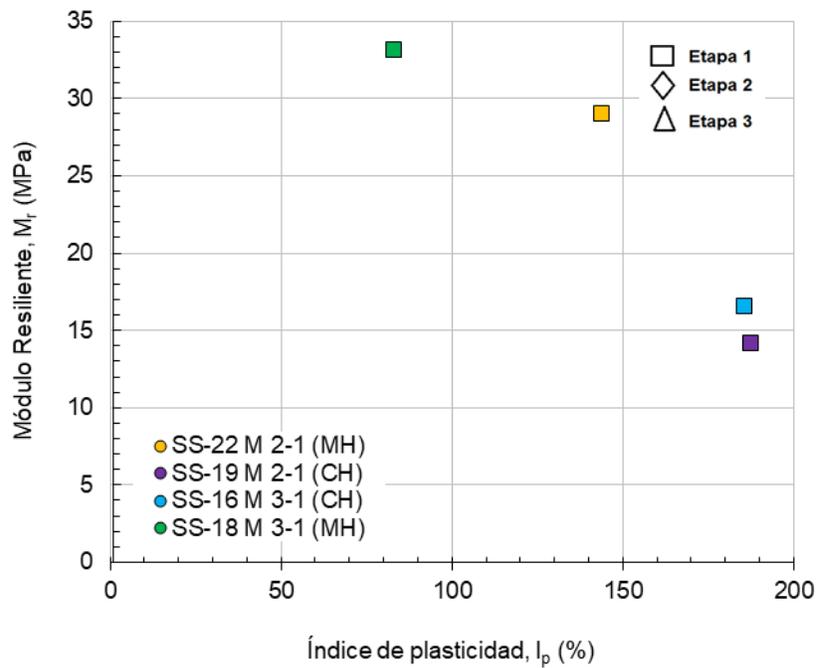


Figura 82. Curva I_p vs. M_r correspondientes al esfuerzo efectivo de 07 kPa descarga.

Análisis de los resultados

A continuación, se expone el análisis de los resultados obtenidos.

Influencia del esfuerzo desviador cíclico

En las Figura 30Figura 29–Figura 37, se muestra el comportamiento de los módulos contra el esfuerzo desviador cíclico de las cuatro probetas de suelo ensayadas.

Para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación, de forma general se puede apreciar que, a medida que se aumenta el valor del esfuerzo desviador aplicado, se genera una degradación de los valores de los módulos.

Este comportamiento es independiente del módulo, es decir, la degradación del módulo al aumentar el esfuerzo desviador ocurre tanto para el módulo dinámico equivalente de Young como para el módulo de resiliencia, y ocurre tanto para el tramo de carga como para el tramo de descarga en cada una de las probetas ensayadas.

La degradación de los valores de los módulos está directamente relacionada con la curva de esfuerzo-deformación (ciclos de histéresis, Figura 24 a la Figura 29) que se obtiene tras la aplicación de los ciclos de cargas, puesto que, conforme se aumentan las cargas aplicadas en las probetas, se generan mayores deformaciones. Esto genera que la pendiente de cada uno de los ciclos de histéresis, a medida que se aumentan las cargas aplicadas, decrezca más respecto a la anterior.

Por otra parte, debido al cambio volumétrico producto de las etapas de consolidación aplicadas, existe una reducción de las dimensiones de las probetas de suelo. Asimismo, debido a que los esfuerzos desviadores aplicados son dependientes del área corregida de la probeta, existe una variación ascendente para el tramo de carga de los valores de los esfuerzos desviadores aplicados, a medida que se aumentaron los esfuerzos efectivos utilizados en las pruebas. Por otra parte, para el tramo de descarga, los esfuerzos desviadores descendieron debido a la recuperación de volumen de las probetas de suelo.

Para los diferentes esfuerzos efectivos aplicados, al comparar los módulos obtenidos en la consolidación secundaria (etapa 2 y 3) con los módulos obtenidos en la consolidación primaria (etapa 1), se puede observar una mejora. No obstante, esta diferencia es mayor conforme aumenta el nivel de esfuerzo efectivo y se hace aún más evidente para aquellos esfuerzos que se encuentran por encima del esfuerzo de preconsolidación.

Influencia de la deformación unitaria axial

En las Figura 38Figura 37–Figura 45, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar el módulo dinámico equivalente de Young y el módulo de resiliencia contra la deformación unitaria.

Para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación, observa que, de forma general, conforme se aumentó el esfuerzo efectivo de consolidación, los rangos de deformación de las probetas de suelo disminuyeron considerablemente para el tramo de carga, mientras que para el tramo de descarga, las deformaciones incrementaron tomando como referencia los valores obtenidos para el último esfuerzo efectivo aplicado en la etapa de carga en cada una de las probetas ensayadas. El comportamiento se muestra en las deformaciones correspondientes tanto al módulo E_{eq} como a M_r .

Dicho comportamiento está directamente relacionado con el proceso de

consolidación y al cambio volumétrico que esto conlleva, puesto que, al haber una expulsión de agua en la probeta de suelo, la relación de vacíos disminuye y se vuelve más rígida, disminuyendo los niveles de deformaciones experimentados para el tramo de carga. Por otro lado, para el tramo de descarga ocurre una recuperación de volumen en la probeta, lo cual causa que haya deformaciones mayores que las obtenidas en comparación con el último valor de esfuerzo efectivo aplicado para el tramo de carga.

Debido a que la deformación unitaria axial depende de manera directa de la magnitud del esfuerzo desviador aplicado, se puede decir que, independientemente del nivel de esfuerzos efectivo aplicado y sus respectivas etapas de consolidación, a mayor esfuerzo desviador, mayor es el valor de la deformación unitaria axial. También se evidencia que, entre menores sean los rangos de deformación de la muestra, mayores son los módulos obtenidos.

En lo que concierne al esfuerzo de preconsolidación, se puede observar que, después de la aplicación de un esfuerzo efectivo mayor al esfuerzo de preconsolidación, los módulos presentan la disminución más importante respecto a sus rangos de deformación.

Influencia causada por la consolidación

En cuanto a los valores de los módulos que se observan en las Figura 30–Figura 45, se puede señalar que la influencia causada por la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco se manifiesta como un aumento en los valores tanto del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) como del módulo resiliente (M_r). Es decir, al comparar los valores obtenidos para cada uno de los esfuerzos efectivos en las etapas de la consolidación secundaria (etapas 2 y 3) con los valores de los módulos obtenidos en la etapa de la consolidación primaria (etapa 1), se puede apreciar que existe un incremento considerable para los módulos de las etapas 2 y 3, en especial para los σ' altos.

Esto se debe a que los σ' aplicados por encima del σ'_p rebasan la sobrecarga efectiva que el suelo ha experimentado en su historial de cargas. Por lo anterior es que a las probetas de suelo, cuando se les aplican los esfuerzos

efectivos por encima del σ'_p , experimentan un aumento considerable respecto a sus cambios volumétricos (ΔV) en comparación con aquellos esfuerzos que se encuentran por debajo. Este ΔV mayor conlleva una importante disminución de la relación de vacíos, lo cual causa que la probeta se vuelva más rígida. Así genera el aumento en los módulos que se obtuvieron para σ' por encima del σ'_p . El cambio volumétrico para cada incremento de esfuerzo efectivo y en sus respectivas etapas de consolidación se visualiza en el Apéndice 5.

Los resultados numéricos de los ensayos realizados para obtener los módulos se podrán observar en el Apéndice 2, donde se presenta un resumen de las cargas axiales aplicadas, el esfuerzo desviador, su respectiva deformación unitaria axial y los módulos (E_{eq} y M_r) que se obtuvieron para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados en sus respectivas etapas de consolidación. Los valores de los módulos obtenidos se encuentran en un rango de 5 MPa hasta los 70 MPa, tanto para E_{eq} como para M_r ; esto al considerar los resultados obtenidos para las 4 muestras ensayadas.

En el Apéndice 4, se muestra una comparación en términos porcentuales entre los módulos obtenidos para la consolidación primaria (etapa 1) y la consolidación secundaria (etapa 2 y 3) para cada uno de los diferentes esfuerzos efectivos aplicados. La comparación se realizó tomando como referencia los módulos obtenidos para la etapa 1, con la intención de evidenciar de manera porcentual cuánto incrementaron ambos módulos para la etapa 2 y 3. De los valores obtenidos para las cuatro muestras ensayadas, se registran incrementos de hasta 18 % y 19 % para E_{eq} y M_r en la consolidación secundaria respecto a la consolidación primaria para el tramo de carga.

Según lo mostrado en las Figura 30–Figura 45 y en el Apéndice 4, al comparar los módulos obtenidos en la etapa de descarga con los obtenidos durante la etapa de carga para un mismo nivel de σ' (07 kPa y 40 kPa), se logra apreciar que los módulos correspondientes al tramo de descarga presentan un aumento en sus magnitudes respecto al módulo para el tramo de carga de ese mismo nivel de esfuerzo efectivo utilizado. El comportamiento descrito demuestra que el valor de los módulos obtenidos se encuentra en función del historial de cargas que la muestra de suelo haya experimentado. En el Apéndice 4 se muestra que los módulos del tramo de descarga en comparación con los del tramo de carga presentan un aumento de hasta

375 % para el caso del módulo dinámico equivalente de Young, y de 400 % para el módulo Resiliente.

Este hecho es de suma importancia cuando en una obra de ingeniería se plantea el uso de sistemas de pre-compresión para un mejoramiento de las propiedades del suelo seleccionado. Según Braja (2015), el método de la pre-compresión se puede utilizar cuando en una masa de suelo se esperan grandes asentamientos producto de la consolidación del suelo, como resultado de la construcción de grandes edificios, carreteras o presas de tierra. Esto se debe a que, mediante el uso de una precarga previamente diseñada, se pueden reducir en gran cantidad el asentamiento post-construcción.

Para la medición de los módulos E_{eq} y M_r en laboratorio, la consolidación secundaria generalmente no se evalúa. En este caso en particular, al saber que el suelo iba a experimentar la consolidación secundaria debido a la precarga colocada en la zona, es válido realizar la evaluación de la influencia de la consolidación secundaria en los módulos, puesto que, al no hacerlo y realizar las mediciones de E_{eq} y M_r tal y como se indica en las normas ASTM D 3999 (1991) para E_{eq} y AASTHO T 307 (2002) para M_r , (sin tomar en cuenta la consolidación secundaria), se está siendo conservador con los valores de los módulos obtenidos, ya que, como se ha evidenciado, la influencia de la consolidación secundaria en la magnitud de los módulos es significativa y además favorable, representada en un incremento de estos.

Comparativa de los módulos obtenidos

Para este proyecto de graduación, dado que se realizaron mediciones de los módulos tanto en la consolidación primaria como en la secundaria (etapas 1, 2 y 3), en las Figura 46–Figura 49 se presenta una comparativa de los módulos obtenidos por etapa de consolidación para el tramo de carga, así como los módulos obtenidos para el tramo de descarga de las cuatro muestras ensayadas.

En todos los casos, se puede apreciar la relación lineal existente entre los dos módulos. Tomando en cuenta que el coeficiente de determinación (R^2) es de 0,99, se puede afirmar, igual que Romero (2018), que existe una

adecuada relación lineal entre los módulos determinados

Para fines prácticos, se podrá determinar la magnitud de los módulos E_{eq} o M_r , sin importar el tipo de prueba a ejecutar (triaxiales cíclicas convencionales o de módulo resiliente). Lo anterior es válido para la zona del antiguo lago de Texcoco donde se realizó la recuperación de las muestras ensayadas y para condiciones similares a las utilizadas en estas pruebas triaxiales (niveles de esfuerzo efectivo utilizados, niveles de esfuerzo desviador aplicados y grado de consolidación).

Influencia de la relación de vacíos

En las Figura 50Figura 49–Figura 57, se muestran las curvas de relación de vacíos (e) vs. tiempo (t) de cada una de las muestras ensayadas.

Aquí puede apreciar que, para el tramo de carga, la disminución de la relación de vacíos es mayor para los esfuerzos efectivos aplicados por encima del esfuerzo de preconsolidación que para aquellos esfuerzos efectivos menores al σ'_p . Este hecho guarda relación con la diferencia del cambio volumétrico que tiene la probeta de suelo antes y después de dicho esfuerzo de σ'_p .

Para el tramo de descarga, debido a la recuperación de volumen que experimentan las probetas de suelo, no ocurre una expulsión de agua, sino más bien una absorción, ya que se pasa directamente de la aplicación de un esfuerzo mayor a uno más pequeño y, por ende, ocurre un aumento en la relación de vacíos, tomando como referencia el valor de relación de vacíos del último esfuerzo efectivo aplicado en el tramo de carga de las curvas de compresibilidad (Figura 20 a la Figura 23).

De acuerdo con lo anterior, se puede reafirmar la relación directa que existe entre el cambio volumétrico y la relación de vacíos. Esto se puede evidenciar de mejor forma en el Apéndice 4, donde se muestra la variación del cambio volumétrico para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación, así como las relaciones de vacíos asociadas a cada cambio de volumen que las muestras experimentaron. Con esto, de forma numérica, se evidencia que, conforme la muestra pierde volumen debido a la expulsión de agua, la

relación de vacíos disminuye; esto para el tramo de carga, mientras que para el tramo de descarga, la relación de vacíos aumenta debido a la absorción de agua.

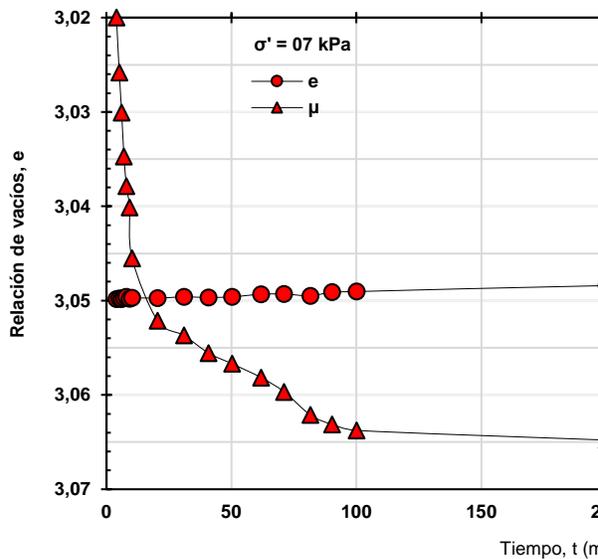
Por otra parte, respecto a los módulos E_{eq} y M_r , se puede apreciar que, en las cuatro probetas de suelo ensayadas, al haber una expulsión de agua y su consecuente disminución en la relación de vacíos, los valores de los módulos incrementaron; es decir, a medida que disminuyó la relación de vacíos por el proceso de consolidación, se generó un incremento en la rigidez de las probetas, dando como resultados la obtención de módulos mayores.

Con base en el Apéndice 4 y por medio de una comparación entre los cambios de volumen obtenidos para la consolidación primaria (etapa 1) con los obtenidos para la consolidación secundaria (etapa 2 y 3) en cada uno de los diferentes esfuerzos efectivos aplicados, se puede apreciar que, en la consolidación secundaria, el cambio volumétrico experimentado (y, por ende, su cambio en la relación de vacíos) es mucho menor. Esto respalda lo que se menciona en la teoría, puesto que Braja (2015), menciona que en la consolidación secundaria ocurre más que todo un reajuste plástico del suelo (reacomodo de las partículas) y que el cambio volumétrico no es tan significativo como en la consolidación primaria, pero sí existe.

Tomando en cuenta lo anterior, y según lo demostrado en las Figura 30–Figura 45, este reacomodo de partículas propio de la consolidación secundaria es el que causa que, a la hora de realizar las mediciones de los módulos E_{eq} y M_r en cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados, se obtengan módulos más altos para la consolidación secundaria respecto a los obtenidos para la consolidación primaria. Por consiguiente, se podría decir que este reajuste plástico favorece las propiedades de rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco.

Disipación del exceso de presión de poro

En las Figura 58–Figura 66iError! No se encuentra el origen de la referencia. y en el



, se muestran las curvas de disipación del exceso de presión de poro (μ) y la relación de vacíos (e) generado durante los ensayos triaxiales, respecto a los tiempos de consolidación a los que cada una de las probetas fue sometida.

En las curvas se aprecia que, para el caso de la presión de poro, el exceso generado debido al esfuerzo de confinamiento aplicado en la cámara triaxial se disipa con el transcurso de la consolidación. Es decir, conforme se produce el cambio volumétrico, la presión de poro generada se va disipando. El valor del exceso de la presión de poro alcanzado en el caso de las pruebas de laboratorio depende del nivel del esfuerzo de confinamiento aplicado, de manera que, a mayor esfuerzo confinante, mayor será el exceso de presión de poros generado en las probetas de suelo.

Debido a que se utilizaron diferentes esfuerzos para las etapas de consolidación, para cada uno de los casos se produjo un exceso de presión de poros diferente. Lo mostrado en las curvas corresponde a la disipación en forma porcentual del exceso de presión de poro generado en cada caso, donde el 0 % se relaciona con la presión de poro máxima y el valor del 100 % se vincula con el momento en el que esa presión de poro máxima que se había generado se disipa; es decir, el transcurso del 0 % al 100 % representa el comportamiento desde la presión de poro máxima alcanzada hasta que se disipa.

Lo mostrado en las Figura 58–Figura 66 permite observar de forma simultánea el comportamiento de la disipación del exceso de presión de poro y la relación de vacíos. En el caso de la presión de poro, se observa que al

inicio de la consolidación (en los primeros minutos) ocurre una disipación súbita del exceso de presión de poro hasta alcanzar valores cercanos al 100 % de la disipación del exceso generado. Posteriormente, muestra un comportamiento más bien asintótico respecto a estos valores máximos alcanzados, mientras que, por otra parte, la disminución de la relación de vacíos ocurre de forma gradual a través del tiempo.

Este hecho permite demostrar que aún después de la disipación del exceso de presión de poro, la relación de vacíos sigue disminuyendo; es decir, en la etapa de la consolidación secundaria, la probeta de suelo sigue experimentando un cambio volumétrico que se refleja en una disminución de la relación de vacíos. Esto hace que la muestra se vuelva más rígida y, por ende, al comparar los módulos obtenidos (Figura 30 a la Figura 45) en la consolidación secundaria (etapa 2 y 3), estos sean mayores que los obtenidos en la consolidación primaria (etapa 1).

Es importante recordar que los tiempos utilizados para las mediciones de los módulos en la consolidación secundaria fueron de únicamente 24 horas. A pesar de que, como bien se ha demostrado, este tiempo fue el necesario para lograr establecer la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible, lo más óptimo para futuras investigaciones sería evaluar los módulos (E_{eq} y M_r) en tiempos más prolongados, con la intención de obtener información más detallada del comportamiento de los cambios volumétricos, la disipación del exceso de presión de poros y la relación de vacíos a través del tiempo.

Influencia de las características de las muestras

En la Tabla 2 y la Tabla 3, se aprecian los límites de consistencia y relaciones volumétricas de las probetas de suelo utilizadas en este proyecto.

De acuerdo con Vega (2003), en exploraciones y estudios anteriores se ha encontrado la presencia de sal en la zona del antiguo lago de Texcoco, obteniendo que la concentración salina del agua intersticial del subsuelo se encuentra en el rango de 2 % hasta un 8 %. En la zona del antiguo lago de Texcoco,

como resultado de esta presencia de sal en el subsuelo, se han encontrado valores altos para la densidad de sólidos (G_s) que van desde 2,5 hasta más de 3. En este caso, las probetas ensayadas presentan valores entre 2,92 y 3,53. Si se comparan los valores de G_s de estas probetas de suelo con la densidad de sólidos de arcillas provenientes de una zona que no tenga estos niveles tan altos de sal, se podrá observar que la influencia de la presencia de sal respecto a G_s se manifiesta en un incremento de dichos valores.

Según Vega (2003), la presencia de sal en el agua intersticial afecta las propiedades índices del subsuelo, tales como el contenido de agua (ω), el límite líquido (L_w), el límite plástico (L_P) y el índice de plasticidad (I_P), puesto que, al comparar las propiedades entre muestras obtenidas de zonas con alto contenido de sal y zonas con contenidos de sal más bajos, se halló que estas propiedades resultan menores en muestras que presentan contenidos de sal mayores. Evidencias de la salinidad presente en el subsuelo del antiguo lago de Texcoco se pueden visualizar en el Apéndice 1, en el que se muestran imágenes de restos de sal retenidos por las piedras del equipo triaxial al finalizar los ensayos.

Respecto a los valores de los límites de consistencia obtenidos para las muestras, para establecer una relación entre estos y los módulos (E_{eq} y M_r), en las Figura 67–Figura 82, se muestran las curvas de I_P vs. E_{eq} , así como I_P vs M_r . La tendencia de los resultados mostrados, tanto para E_{eq} como para M_r , indican que conforme aumenta el índice de plasticidad de las probetas ensayadas, los valores de E_{eq} y M_r

disminuyen; es decir, la probeta con el índice de plasticidad más alto (SS-18 M 3-1) presentó los valores de E_{eq} y M_r más bajos. Este comportamiento se mantuvo en los diferentes esfuerzos efectivos utilizados y las respectivas etapas de consolidación.

Como se expuso anteriormente, la salinidad característica de la zona tiene efectos en el L_w , L_P y, por lo tanto, en el I_P es válido mencionar que la presencia de sal podría afectar el valor de los módulos. Sin embargo, la determinación del grado de afectación causado por la presencia de sal no se encontraba dentro de los alcances de este proyecto de graduación, de manera que una recomendación para futuras investigaciones sería la evaluación del efecto de la presencia de sal al obtener los módulos E_{eq} y M_r durante la consolidación secundaria.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos y el análisis realizado, se evidenció que el valor de los módulos (E_{eq} y M_r) depende de diversos factores, tales como el esfuerzo de preconsolidación de la muestra de suelo, el esfuerzo efectivo de consolidación aplicado, la relación de vacíos, los esfuerzos desviadores aplicados, la deformación unitaria, límites de consistencia y, en este caso, el grado de

consolidación del suelo (medición de módulo en consolidación primaria o secundaria).

Por otra parte, debido a que para términos de ensayos, resultados y análisis se utilizaron únicamente cuatro muestras recuperadas de la zona del antiguo lago de Texcoco, sería difícil establecer un valor específico que indique de forma general cuál es la influencia que ejerce la consolidación

secundaria en la rigidez dinámica (módulos E_{eq} y M_r) de las arcillas del antiguo lago de Texcoco. Es decir, conforme aumentan dichos módulos, baja la influencia de la consolidación secundaria, ya que, como se mencionó anteriormente, esto depende de una serie de factores diversos que hacen que cada zona presente valores propios.

Lo que sí es válido concluir, según lo descrito en la sección de análisis, en conjunto con lo mostrado en los resultados y apéndices, es que la influencia que ejerce la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco es generar un aumento en su rigidez dinámica, lo cual fue demostrado mediante la evaluación de los módulos en diferentes etapas de la consolidación (primaria y secundaria).

La revisión bibliográfica llevada a cabo permitió conocer que no hay documentación acerca de otros trabajos anteriores que se encuentren relacionados con la evaluación de la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de un suelo compresible, específicamente en los módulos E_{eq} y M_r de la zona del antiguo lago de Texcoco.

A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas para este proyecto de graduación:

La investigación de las características geotécnicas permitió conocer que los suelos del antiguo lago de Texcoco se encuentran compuestos principalmente por arcillas compresibles, con resistencias bajas al esfuerzo cortante y contenidos de agua muy altos.

Se realizó una revisión bibliográfica que permitió conocer el procedimiento adecuado para llevar a cabo las pruebas triaxiales dinámicas (CU).

Entre las cuatro muestras ensayadas, se obtuvieron magnitudes de módulos que oscilaron entre los 5 MPa y los 70 MPa. El amplio rango de valores se debe a variables como el esfuerzo de preconsolidación (σ'_p), los esfuerzos efectivos aplicados (σ'), el esfuerzo desviador utilizado (σ'_d), la deformación unitaria (ϵ), el índice de plasticidad (I_p) y la relación de vacíos (e).

Los tiempos de 24 horas utilizados en la medición de los módulos permitieron establecer de manera satisfactoria la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco.

El efecto de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco es tal que tanto el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) como el módulo de resiliencia (M_r) experimentan un incremento al comparar los valores obtenidos al término de la consolidación primaria con los obtenidos durante la consolidación secundaria.

Los valores de los módulos obtenidos durante la consolidación secundaria exceden hasta en un 18 % en el caso del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}), y hasta en un 19 % a los valores obtenidos durante la consolidación primaria.

Para cualquier nivel de esfuerzo efectivo utilizado en cada una de las etapas de consolidación, al aumentar el valor del esfuerzo desviador, se genera una degradación tanto del módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) como del módulo de resiliencia (M_r); esto debido a que se generan mayores niveles de deformación.

Se observó que las probetas de suelo con esfuerzos de pre-consolidación más altos presentaron los mayores módulos E_{eq} y M_r , las cuales fueron las muestras SS-22 M 2-1 y SS-18 M 3-1 con 46 kPa y 40 kPa, respectivamente. Por su lado, las muestras Ss-19 M2-1 y SS-16 M 3-1 presentaron valores de 24 kPa y 29 kPa, respectivamente.

Los módulos medidos por encima del esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) presentan rangos de deformación menores que aquellos módulos medidos por debajo del σ'_p .

Al aplicar esfuerzos efectivos (σ') mayores al esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) de las probetas de suelo, se observó un incremento en los valores de los módulos obtenidos al compararlos con los módulos menores que el σ'_p .

Existe una relación lineal entre los valores de los módulos dinámico equivalente de Young

(E_{eq}) y el módulo de resiliencia (M_r), para un mismo nivel de esfuerzo efectivo y en sus diferentes etapas de consolidación.

Como se indica en la teoría, durante la etapa de la consolidación primaria existe un gran cambio volumétrico a través del tiempo, mientras que, para la etapa de la consolidación secundaria, sigue existiendo un cambio volumétrico, pero mucho menor.

La disminución de la relación de vacíos ligada al cambio volumétrico ocurrido en cada proceso de consolidación para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados favorece la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco. Esto genera la obtención de módulos mayores para la consolidación secundaria en comparación con los módulos obtenidos para la consolidación primaria.

Durante el proceso de consolidación, se produce un exceso de presión de poro, el cual se disipa a través del tiempo; una vez disipado el exceso generado, la relación de vacíos sigue disminuyendo. Esto evidencia que, aún en la consolidación secundaria, se presenta una disminución de la relación de vacíos.

Los valores de I_p de las muestras utilizadas se encuentran en un rango entre 82 % y 187 %. Las muestras de suelo con los índices de plasticidad más bajos fueron las que presentaron los módulos (E_{eq} y M_r) más altos.

Recomendaciones

Se recomienda para futuras investigaciones la utilización de una mayor cantidad de muestras, con el fin de que los datos obtenidos de los módulos sean aún más representativos.

Se recomienda realizar evaluaciones de la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco con mayores periodos para las mediciones de los módulos (E_{eq} y M_r) en la

consolidación secundaria; es decir, utilizar periodos mayores a las 24 horas dadas en este proyecto de graduación, con la intención de llevar a cabo un análisis aún más completo del comportamiento de los módulos bajo la influencia de la consolidación secundaria.

Debido a que se desconoce el grado de afectación en la medición de los módulos a causa de la presencia de sal, se recomienda que en futuras investigaciones se contemple

la evaluación del efecto que la presencia de sal pueda causar al obtener los módulos E_{eq} y M_r en general y, en este caso en específico, durante la consolidación secundaria.

Puesto que no existen antecedentes de estudios en los que se haya evaluado la influencia de la consolidación secundaria en la rigidez dinámica de las arcillas del antiguo lago de Texcoco, es recomendable para futuras investigaciones realizar una comparación con estos resultados, con el objetivo de complementar la información.

Referencias

AASTHO T 307. (2002). *Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASTHO.

ASTM D 2216. (1998). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*, American Society of Testing Materials, ASTM.

ASTM D 2487. (2000). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering*

- Purposes (Unified Soil Classification System), American Society of Testing Materials, ASTM.*
- ASTM D 3999. (1991). *Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus, American Society of Testing Materials, ASTM.*
- ASTM D 4318. (2000). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, American Society of Testing Materials, ASTM.*
- ASTM D 4767. (1996). *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, American Society of Testing Materials, ASTM.*
- ASTM D 854. (2002). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, American Society of Testing Materials, ASTM.*
- Braja, D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Ciudad de México: Cengage Learning Editores S.A.
- Casagrande, A. (1936). *Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance, Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, 60–64*. Cambridge.
- Córdoba, G. (1986). *Comportamiento de la arcilla de la ciudad de Mexico ante cargas ciclicas. Tesis de Maestría en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM*. Ciudad de México.
- Díaz, J. A. (2005). *Dinámica de Suelos*. Ciudad de México: Editorial Limusa.
- Enríquez, O. (2009). *Comportamiento dinámico de suelos arcillosos en la zona del lago de Texcoco*. Ciudad de México, México.
- Flores, O., Gómez, E., Romo, M. P., & Flores, R. (2002). *Instrumentación y automatización del equipo triaxial*. Querétaro, México.
- Gárnica, P., Pérez, N., & Lavariega, D. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Publicación Técnica No. 197.
- II-UNAM. (2016). *Investigaciones y estudios especiales relacionados con aspectos geotécnicos del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el vaso del ex Lago de Texcoco, Zona Federal. Tercer informe parcial del Instituto de Ingeniería, UNAM*.
- Instituto Mexicano del Transporte . (2001). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*. Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte (ITM). Publicación Técnica No. 142. Retrieved mayo 20, 2019
- Instituto Mexicano del Transporte . (2014). *Comportamiento dinámico de suelos no saturados y su aplicación a las vías terrestres*. Sanfandila, Querétaro. Publicación Técnica No. 420.
- Jaime, A., Reséndiz, D., & Romo, M. (1989). *El subsuelo del Valle de México: Propiedades dinámicas y zonificación, Revista Ingeniería de la FI, UNAM, Vol. LVIII, No. 2*.
- Liu, J.-s., & Zhang, X.-d. (2014). *Experimental Study on the Dynamic Characteristic of Soft Soil under Cyclic Loads, Journal of Highway and Transportation Research and Development, vol 8, No. 4*.
- Marsal, R. (1975). *The lacustrine clays of the Valley of Mexico, Instituto de Ingeniería de la UNAM*.
- Ossa, A. (2004). *Modelo elastoviscoplastico (EVP) para el estudio de la consolidación unidimensional de los suelos. Tesis de Maestría en*

Ingeniería, Facultad de Ingeniería,
UNAM. Ciudad de México.

Paredes, A. (1987). *Características dinámicas de la arcilla del valle de México*. Ciudad de México, México.

Romero, T. (2018). *Evaluación comparativa del módulo dinámico y resiliente en las arcillas del exlago de Texcoco*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.

Saldierna, V. M. (1988). *Influencia del tiempo en el modulo de rigidez dinamica del suelo*. Ciudad de México, México. Retrieved marzo 15, 2019

Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., & León, E. (2005). *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*, TGC Ediciones.

Seed, H., & Chan, C. (1966). Clay Strength under earthquake loading conditions. *Journal of the soil Mechanics and foundations divisions, American society of civil engineers.*, Vol 92, 53-78.

Solís, L. (2017). *Propiedades y modelos dinámicos para las arcillas del ex lago Texcoco*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.

Vega, L. (2003). *Análisis y modelación de algunas propiedades dinámicas de las arcillas del ex lago de Texcoco*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.

Zárate, M. (2016). *Comportamiento del pavimento en pistas y plataformas del AICM construidas mediante sección compensada*.

Zaretskii, Y. (1973). Consolidation and creep with consideration of size distribution of pores in soil, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol 92, No. 4, pp 274–278.

Zeevaert, L. (1953). *Outline on the stratigraphical and mechanical characteristics on the unconsolidated sedimentary deposits in the basin of valley of México*.

Apéndices

Los apéndices que se presenta corresponden a:

Apéndice 1. Evidencias fotográficas.

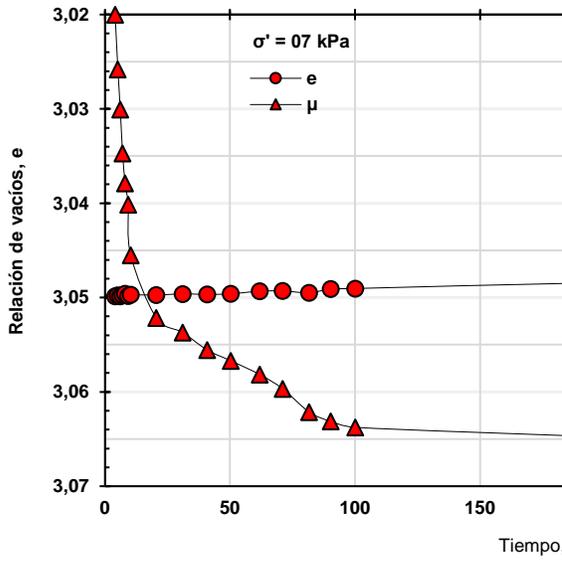
Apéndice 2. Resultados de los ensayos de cada muestra.

Apéndice 3. Comparación en porcentajes de los módulos (E_{eq} y M_r) para cada uno de los

esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación.

Apéndice 4. Cambios volumétricos (ΔV) y relación de vacíos (e) de las muestras ensayadas para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en su respectiva etapa de consolidación.

Apéndice 5. Cambio volumétrico (ΔV) vs tiempo (t) de las muestras ensayadas.



. Disipación del exceso de presión de poro.

Apéndice 1. Evidencias fotográficas.



Figura 83. Extracción y labrado de las probetas de suelo.
Fuente: elaboración propia.



Figura 84. Equipo MTS y cámara triaxial utilizada.
Fuente: elaboración propia.



Figura 85. Montaje de la probeta de suelo en la cámara triaxial.
Fuente: elaboración propia.



Figura 86. Muestra SS – 22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.



Figura 87. Muestra SS – 19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia.



Figura 88. Muestra SS – 16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.



Figura 89. Muestra SS – 18 M 3-1.
Fuente: elaboración propia.



Figura 90. Presencia de sal en las muestras al final del ensayo.
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Resultados de los ensayos de cada muestra.

Tabla 6. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 22 M 2-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00028	2,97	10,47
		2,0	5,10	0,00055	5,40	9,79
		3,0	7,65	0,00083	7,88	9,45
		4,0	10,20	0,00117	10,26	8,97
		5,0	12,75	0,00158	12,94	8,19
	2	1,0	2,55	0,00027	2,79	9,67
		2,0	5,10	0,00056	5,25	9,06
		3,0	7,65	0,00092	7,60	8,40
		4,0	10,20	0,00131	10,22	7,68
		5,0	12,75	0,00168	12,74	7,45
	3	1,0	2,55	0,00030	2,98	9,87
		2,0	5,10	0,00057	5,35	9,39
		3,0	7,65	0,00086	7,87	9,05
		4,0	10,20	0,00123	10,40	8,55
		5,0	12,75	0,00159	12,84	8,05
15,0	1	1,0	2,55	0,00027	2,93	11,32
		2,0	5,10	0,00053	5,42	10,13
		3,0	7,65	0,00080	8,09	9,89
		4,0	10,20	0,00108	10,68	9,67
		5,0	12,75	0,00135	13,19	9,51
	2	1,0	2,55	0,00026	3,01	11,65
		2,0	5,10	0,00048	5,40	11,18
		3,0	7,65	0,00074	7,96	10,78
		4,0	10,20	0,00100	10,50	10,49
		5,0	12,75	0,00132	13,12	9,98
	3	1,0	2,55	0,00022	2,96	12,77
		2,0	5,10	0,00044	5,39	11,83
		3,0	7,65	0,00068	7,90	11,34
		4,0	10,20	0,00094	10,51	10,95
		5,0	12,75	0,00127	13,09	10,30
25,0	1	1,0	2,55	0,00021	3,04	13,58
		2,0	5,10	0,00042	5,59	13,22
		3,0	7,65	0,00063	8,13	12,78
		4,0	10,20	0,00085	10,69	12,45
		5,0	12,75	0,00108	13,30	12,11
	2	1,0	2,55	0,00024	2,98	14,81
		2,0	5,10	0,00042	5,43	14,41
		3,0	7,65	0,00062	8,01	14,02
		4,0	10,20	0,00083	10,61	13,52
		5,0	12,75	0,00105	13,10	13,11
	3	1,0	2,55	0,00019	3,02	16,04
		2,0	5,10	0,00036	5,58	15,35
		3,0	7,65	0,00055	8,12	14,82
		4,0	10,20	0,00075	10,72	14,20
		5,0	12,75	0,00096	13,29	13,77
40,0	1	1,0	2,55	0,00016	3,16	20,38
		2,0	5,10	0,00029	5,73	19,82
		3,0	7,65	0,00044	8,37	19,16
		4,0	10,20	0,00059	11,00	18,53
		5,0	12,75	0,00076	13,64	17,92
	2	1,0	2,55	0,00015	3,09	20,81
		2,0	5,10	0,00030	5,67	20,43
		3,0	7,65	0,00044	8,29	19,71
		4,0	10,20	0,00059	10,96	18,92
		5,0	12,75	0,00075	13,64	18,59
	3	1,0	2,55	0,00014	3,00	21,30
		2,0	5,10	0,00028	5,70	20,75
		3,0	7,65	0,00041	8,32	20,21
		4,0	10,20	0,00056	10,99	19,76
		5,0	12,75	0,00071	13,67	19,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 22 M 2-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	1	1,0	2,55	0,00012	3,12	26,64
		2,0	5,10	0,00023	5,92	26,13
		3,0	7,65	0,00034	8,73	25,63
		4,0	10,20	0,00046	11,54	24,99
		5,0	12,75	0,00059	14,31	24,29
	2	1,0	2,55	0,00013	3,34	27,46
		2,0	5,10	0,00023	6,00	27,03
		3,0	7,65	0,00034	8,80	26,52
		4,0	10,20	0,00046	11,60	25,94
		5,0	12,75	0,00059	14,41	25,34
	3	1,0	2,55	0,00010	3,36	28,67
		2,0	5,10	0,00020	6,11	28,20
		3,0	7,65	0,00031	8,90	27,51
		4,0	10,20	0,00043	11,71	26,69
		5,0	12,75	0,00055	14,53	26,02
90,0	1	1,0	2,55	0,00010	3,84	40,77
		2,0	5,10	0,00017	6,92	40,13
		3,0	7,65	0,00026	10,15	39,45
		4,0	10,20	0,00035	13,32	38,70
		5,0	12,75	0,00044	16,52	37,92
	2	1,0	2,55	0,00009	3,83	41,65
		2,0	5,10	0,00017	6,95	40,97
		3,0	7,65	0,00025	10,16	40,25
		4,0	10,20	0,00034	13,38	39,50
		5,0	12,75	0,00043	16,58	39,00
	3	1,0	2,55	0,00010	3,90	42,83
		2,0	5,10	0,00018	7,02	42,05
		3,0	7,65	0,00026	10,21	41,26
		4,0	10,20	0,00034	13,44	40,53
		5,0	12,75	0,00043	16,70	39,88
120,0	1	1,0	2,55	0,00007	3,85	51,47
		2,0	5,10	0,00013	6,91	50,06
		3,0	7,65	0,00020	10,08	49,02
		4,0	10,20	0,00027	13,26	47,75
		5,0	12,75	0,00035	16,46	46,64
	2	1,0	2,55	0,00007	3,87	53,58
		2,0	5,10	0,00013	6,90	52,40
		3,0	7,65	0,00019	10,09	51,16
		4,0	10,20	0,00026	13,30	50,31
		5,0	12,75	0,00033	16,54	49,22
	3	1,0	2,55	0,00007	3,92	54,47
		2,0	5,10	0,00013	6,99	52,97
		3,0	7,65	0,00020	10,24	52,16
		4,0	10,20	0,00026	13,45	51,40
		5,0	12,75	0,00033	16,69	50,51
40.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00008	4,137	52,196
		2,0	5,098	0,00015	7,464	51,114
		3,0	7,647	0,00022	11,002	49,795
		4,0	10,196	0,00030	14,584	48,501
		5,0	12,745	0,00038	18,112	47,155
7.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00009	4,007	43,332
		2,0	5,098	0,00018	7,356	41,868
		3,0	7,647	0,00026	10,855	41,040
		4,0	10,196	0,00036	14,328	39,932
		5,0	12,745	0,00046	17,789	38,942

Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS – 22 M 2-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00025	2,62	10,34
		2,0	5,10	0,00053	4,93	9,55
		3,0	7,65	0,00091	7,52	8,23
		4,0	10,20	0,00123	9,99	8,03
		5,0	12,75	0,00156	12,35	7,86
	2	1,0	2,55	0,00025	2,53	9,77
		2,0	5,10	0,00053	5,00	9,28
		3,0	7,65	0,00085	7,45	8,74
		4,0	10,20	0,00119	9,87	8,29
		5,0	12,75	0,00152	12,31	8,04
	3	1,0	2,55	0,00025	2,56	10,01
		2,0	5,10	0,00054	5,06	9,43
		3,0	7,65	0,00083	7,53	9,10
		4,0	10,20	0,00114	9,98	8,75
		5,0	12,75	0,00147	12,43	8,44
15,0	1	1,0	2,55	0,00023	2,73	11,92
		2,0	5,10	0,00045	5,20	11,37
		3,0	7,65	0,00071	7,69	10,95
		4,0	10,20	0,00097	10,18	10,53
		5,0	12,75	0,00124	12,51	10,10
	2	1,0	2,55	0,00023	2,63	11,84
		2,0	5,10	0,00045	5,16	11,36
		3,0	7,65	0,00070	7,70	10,99
		4,0	10,20	0,00096	10,20	10,56
		5,0	12,75	0,00125	12,70	10,12
	3	1,0	2,55	0,00020	2,60	13,03
		2,0	5,10	0,00043	5,16	11,97
		3,0	7,65	0,00067	7,70	11,40
		4,0	10,20	0,00092	10,20	10,99
		5,0	12,75	0,00119	12,72	10,57
25,0	1	1,0	2,55	0,00021	2,76	13,44
		2,0	5,10	0,00041	5,30	13,01
		3,0	7,65	0,00061	7,86	12,70
		4,0	10,20	0,00083	10,41	12,38
		5,0	12,75	0,00107	12,98	12,01
	2	1,0	2,55	0,00020	2,67	14,20
		2,0	5,10	0,00038	5,23	13,82
		3,0	7,65	0,00057	7,81	13,51
		4,0	10,20	0,00078	10,41	13,25
		5,0	12,75	0,00100	12,94	12,86
	3	1,0	2,55	0,00017	2,76	15,99
		2,0	5,10	0,00035	5,29	15,37
		3,0	7,65	0,00053	7,84	14,80
		4,0	10,20	0,00073	10,42	14,31
		5,0	12,75	0,00093	13,00	13,81
40,0	1	1,0	2,55	0,00015	2,89	19,66
		2,0	5,10	0,00028	5,40	19,32
		3,0	7,65	0,00042	8,00	18,92
		4,0	10,20	0,00059	10,64	18,33
		5,0	12,75	0,00080	13,20	17,81
	2	1,0	2,55	0,00015	2,77	20,77
		2,0	5,10	0,00029	5,41	19,64
		3,0	7,65	0,00043	8,03	19,16
		4,0	10,20	0,00059	10,68	18,75
		5,0	12,75	0,00081	13,35	18,14
	3	1,0	2,55	0,00013	2,86	21,39
		2,0	5,10	0,00027	5,47	20,62
		3,0	7,65	0,00041	8,11	20,15
		4,0	10,20	0,00059	10,83	19,57
		5,0	12,75	0,00075	13,46	18,61

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS – 22 M 2-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	1	1,0	2,55	0,00011	2,94	26,51
		2,0	5,10	0,00023	5,72	26,28
		3,0	7,65	0,00033	8,49	25,78
		4,0	10,20	0,00045	11,32	25,08
		5,0	12,75	0,00058	14,09	24,31
	2	1,0	2,55	0,00011	2,99	27,66
		2,0	5,10	0,00022	5,78	27,00
		3,0	7,65	0,00033	8,57	26,30
		4,0	10,20	0,00045	11,39	25,60
		5,0	12,75	0,00057	14,18	25,11
	3	1,0	2,55	0,00009	2,95	29,59
		2,0	5,10	0,00020	5,78	28,92
		3,0	7,65	0,00031	8,61	28,16
		4,0	10,20	0,00041	11,43	27,38
		5,0	12,75	0,00053	14,24	26,43
90,0	1	1,0	2,55	0,00009	3,51	40,35
		2,0	5,10	0,00017	6,63	39,59
		3,0	7,65	0,00025	9,82	39,31
		4,0	10,20	0,00034	12,96	38,70
		5,0	12,75	0,00042	15,95	37,78
	2	1,0	2,55	0,00009	3,43	41,64
		2,0	5,10	0,00016	6,67	41,14
		3,0	7,65	0,00024	9,82	40,77
		4,0	10,20	0,00033	13,07	40,08
		5,0	12,75	0,00041	16,33	39,34
	3	1,0	2,55	0,00009	3,49	42,48
		2,0	5,10	0,00017	6,76	42,05
		3,0	7,65	0,00025	9,97	41,51
		4,0	10,20	0,00033	13,15	40,92
		5,0	12,75	0,00042	16,44	40,37
120,0	1	1,0	2,55	0,00006	3,85	59,34
		2,0	5,10	0,00013	7,42	58,11
		3,0	7,65	0,00019	10,54	57,01
		4,0	10,20	0,00027	14,49	55,86
		5,0	12,75	0,00046	18,29	54,36
	2	1,0	2,55	0,00007	3,96	61,59
		2,0	5,10	0,00013	7,72	60,75
		3,0	7,65	0,00019	11,06	59,81
		4,0	10,20	0,00026	14,56	58,37
		5,0	12,75	0,00033	18,48	57,34
	3	1,0	2,55	0,00007	4,16	63,57
		2,0	5,10	0,00013	7,79	62,43
		3,0	7,65	0,00019	11,15	61,38
		4,0	10,20	0,00026	14,72	59,23
		5,0	12,75	0,00033	18,30	58,85
40.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00007	3,800	53,016
		2,0	5,098	0,00014	7,457	52,281
		3,0	7,647	0,00021	10,671	51,111
		4,0	10,196	0,00030	14,712	48,851
		5,0	12,745	0,00037	17,903	47,924
7.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00009	3,737	44,610
		2,0	5,098	0,00017	7,217	43,143
		3,0	7,647	0,00025	10,482	42,095
		4,0	10,196	0,00035	14,059	40,788
		5,0	12,745	0,00044	17,565	39,543

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 19 M 2-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00051	3,17	6,22
		2,0	5,10	0,00093	5,69	6,10
		3,0	7,65	0,00140	8,29	5,93
		4,0	10,20	0,00188	10,76	5,74
		5,0	12,75	0,00237	13,18	5,56
	2	1,0	2,55	0,00049	3,13	6,20
		2,0	5,10	0,00091	5,50	6,00
		3,0	7,65	0,00136	7,97	5,83
		4,0	10,20	0,00191	10,40	5,43
		5,0	12,75	0,00242	12,88	5,31
	3	1,0	2,55	0,00047	2,96	6,16
		2,0	5,10	0,00088	5,32	5,98
		3,0	7,65	0,00135	7,85	5,79
		4,0	10,20	0,00184	10,38	5,60
		5,0	12,75	0,00235	12,83	5,44
15,0	1	1,0	2,55	0,00046	3,13	6,79
		2,0	5,10	0,00084	5,54	6,57
		3,0	7,65	0,00127	8,08	6,36
		4,0	10,20	0,00172	10,60	6,14
		5,0	12,75	0,00220	13,08	5,94
	2	1,0	2,55	0,00045	3,14	6,86
		2,0	5,10	0,00083	5,53	6,64
		3,0	7,65	0,00125	8,05	6,43
		4,0	10,20	0,00169	10,56	6,23
		5,0	12,75	0,00217	13,09	6,01
	3	1,0	2,55	0,00043	3,04	6,97
		2,0	5,10	0,00079	5,39	6,74
		3,0	7,65	0,00121	7,94	6,51
		4,0	10,20	0,00166	10,47	6,30
		5,0	12,75	0,00212	12,94	6,10
25,0	1	1,0	2,55	0,00040	3,08	7,49
		2,0	5,10	0,00075	5,47	7,28
		3,0	7,65	0,00113	8,03	7,06
		4,0	10,20	0,00154	10,59	6,84
		5,0	12,75	0,00199	13,19	6,61
	2	1,0	2,55	0,00038	3,02	7,77
		2,0	5,10	0,00072	5,43	7,51
		3,0	7,65	0,00109	8,00	7,29
		4,0	10,20	0,00149	10,61	7,08
		5,0	12,75	0,00191	13,21	6,88
	3	1,0	2,55	0,00039	3,08	7,92
		2,0	5,10	0,00070	5,46	7,76
		3,0	7,65	0,00106	8,05	7,58
		4,0	10,20	0,00144	10,64	7,40
		5,0	12,75	0,00184	13,24	7,20
40,0	1	1,0	2,55	0,00032	3,43	10,74
		2,0	5,10	0,00056	5,99	10,60
		3,0	7,65	0,00083	8,66	10,43
		4,0	10,20	0,00111	11,37	10,22
		5,0	12,75	0,00141	14,10	10,00
	2	1,0	2,55	0,00028	3,22	11,44
		2,0	5,10	0,00052	5,86	11,24
		3,0	7,65	0,00078	8,57	11,04
		4,0	10,20	0,00105	11,34	10,83
		5,0	12,75	0,00133	14,10	10,60
	3	1,0	2,55	0,00027	3,21	11,93
		2,0	5,10	0,00050	5,91	11,72
		3,0	7,65	0,00075	8,65	11,50
		4,0	10,20	0,00102	11,40	11,21
		5,0	12,75	0,00129	14,14	11,02

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 19 M 2-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	Etapa 1	1,0	2,55	0,00021	3,55	16,84
		2,0	5,10	0,00039	6,41	16,54
		3,0	7,65	0,00058	9,38	16,35
		4,0	10,20	0,00077	12,37	16,12
		5,0	12,75	0,00097	15,30	15,87
	Etapa 2	1,0	2,55	0,00021	3,56	17,39
		2,0	5,10	0,00038	6,48	17,15
		3,0	7,65	0,00055	9,35	16,94
		4,0	10,20	0,00074	12,41	16,71
		5,0	12,75	0,00094	15,39	16,44
	Etapa 3	1,0	2,55	0,00020	3,53	17,73
		2,0	5,10	0,00037	6,45	17,54
		3,0	7,65	0,00055	9,44	17,30
		4,0	10,20	0,00073	12,37	17,11
		5,0	12,75	0,00091	15,30	16,85
90,0	Etapa 1	1,0	2,55	0,00015	3,82	25,45
		2,0	5,10	0,00028	7,03	25,25
		3,0	7,65	0,00041	10,17	25,15
		4,0	10,20	0,00054	13,33	24,94
		5,0	12,75	0,00067	16,50	24,68
	Etapa 2	1,0	2,55	0,00015	3,92	27,07
		2,0	5,10	0,00027	7,00	26,46
		3,0	7,65	0,00039	10,18	26,17
		4,0	10,20	0,00052	13,38	25,86
		5,0	12,75	0,00065	16,56	25,57
	Etapa 3	1,0	2,55	0,00014	3,83	27,80
		2,0	5,10	0,00026	7,00	27,19
		3,0	7,65	0,00038	10,14	26,87
		4,0	10,20	0,00050	13,32	26,57
		5,0	12,75	0,00063	16,55	26,26
40.0 descarga	Etapa 1	1,0	2,549	0,00016	3,757	23,396
		2,0	5,098	0,00030	6,934	23,053
		3,0	7,647	0,00044	10,043	22,672
		4,0	10,196	0,00059	13,207	22,366
		5,0	12,745	0,00074	16,374	22,061
7.0 descarga	Etapa 1	1,0	2,549	0,00025	3,625	14,896
		2,0	5,098	0,00045	6,587	14,558
		3,0	7,647	0,00068	9,616	14,247
		4,0	10,196	0,00092	12,705	13,880
		5,0	12,745	0,00117	15,770	13,539

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS - 19 M 2-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00391	0,00	6,26
		2,0	5,10	0,00431	0,00	6,07
		3,0	7,65	0,00474	0,00	5,89
		4,0	10,20	0,00521	0,00	5,64
		5,0	12,75	0,00571	0,00	5,39
	2	1,0	2,55	0,00389	0,00	6,26
		2,0	5,10	0,00431	0,00	6,00
		3,0	7,65	0,00475	0,00	5,77
		4,0	10,20	0,00521	0,00	5,58
		5,0	12,75	0,00570	0,00	5,39
	3	1,0	2,55	0,00388	0,00	6,32
		2,0	5,10	0,00431	0,00	6,00
		3,0	7,65	0,00475	0,00	5,77
		4,0	10,20	0,00521	0,00	5,58
		5,0	12,75	0,00570	0,00	5,38
15,0	1	1,0	2,55	0,00388	0,00	6,80
		2,0	5,10	0,00425	0,00	6,62
		3,0	7,65	0,00465	0,00	6,42
		4,0	10,20	0,00507	0,00	6,19
		5,0	12,75	0,00552	0,00	5,98
	2	1,0	2,55	0,00386	0,00	7,04
		2,0	5,10	0,00423	0,00	6,75
		3,0	7,65	0,00463	0,00	6,52
		4,0	10,20	0,00506	0,00	6,31
		5,0	12,75	0,00549	0,00	6,11
	3	1,0	2,55	0,00385	0,00	7,15
		2,0	5,10	0,00423	0,00	6,82
		3,0	7,65	0,00462	0,00	6,57
		4,0	10,20	0,00504	0,00	6,33
		5,0	12,75	0,00548	0,00	6,12
25,0	1	1,0	2,55	0,00383	0,00	7,73
		2,0	5,10	0,00419	0,00	7,37
		3,0	7,65	0,00456	0,00	7,11
		4,0	10,20	0,00496	0,00	6,85
		5,0	12,75	0,00537	0,00	6,60
	2	1,0	2,55	0,00382	0,00	7,93
		2,0	5,10	0,00416	0,00	7,60
		3,0	7,65	0,00453	0,00	7,32
		4,0	10,20	0,00492	0,00	7,07
		5,0	12,75	0,00533	0,00	6,82
	3	1,0	2,55	0,00383	0,00	7,93
		2,0	5,10	0,00416	0,00	7,78
		3,0	7,65	0,00451	0,00	7,55
		4,0	10,20	0,00489	0,00	7,30
		5,0	12,75	0,00529	0,00	7,05
40,0	1	1,0	2,55	0,00376	0,00	10,88
		2,0	5,10	0,00402	0,00	10,72
		3,0	7,65	0,00429	0,00	10,45
		4,0	10,20	0,00458	0,00	10,16
		5,0	12,75	0,00488	0,00	9,87
	2	1,0	2,55	0,00375	0,00	11,53
		2,0	5,10	0,00400	0,00	11,35
		3,0	7,65	0,00425	0,00	11,07
		4,0	10,20	0,00453	0,00	10,74
		5,0	12,75	0,00482	0,00	10,43
	3	1,0	2,55	0,00374	0,00	11,96
		2,0	5,10	0,00398	0,00	11,74
		3,0	7,65	0,00423	0,00	11,49
		4,0	10,20	0,00449	0,00	11,18
		5,0	12,75	0,00478	0,00	10,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS – 19 M 2-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	Etapa 1	1,0	2,55	0,00369	0,00	16,80
		2,0	5,10	0,00387	0,00	16,75
		3,0	7,65	0,00405	0,00	16,41
		4,0	10,20	0,00425	0,00	16,08
		5,0	12,75	0,00445	0,00	15,71
	Etapa 2	1,0	2,55	0,00367	0,00	17,78
		2,0	5,10	0,00385	0,00	17,35
		3,0	7,65	0,00403	0,00	17,03
		4,0	10,20	0,00423	0,00	16,72
		5,0	12,75	0,00443	0,00	16,28
	Etapa 3	1,0	2,55	0,00367	0,00	18,03
		2,0	5,10	0,00385	0,00	17,77
		3,0	7,65	0,00403	0,00	17,39
		4,0	10,20	0,00422	0,00	16,91
		5,0	12,75	0,00441	0,00	16,52
90,0	Etapa 1	1,0	2,55	0,00363	0,00	25,79
		2,0	5,10	0,00376	0,00	25,28
		3,0	7,65	0,00388	0,00	25,05
		4,0	10,20	0,00402	0,00	24,63
		5,0	12,75	0,00417	0,00	24,27
	Etapa 2	1,0	2,55	0,00363	0,00	26,78
		2,0	5,10	0,00375	0,00	25,93
		3,0	7,65	0,00388	0,00	25,88
		4,0	10,20	0,00401	0,00	25,39
		5,0	12,75	0,00414	0,00	25,13
	Etapa 3	1,0	2,55	0,00362	0,00	27,75
		2,0	5,10	0,00374	0,00	26,95
		3,0	7,65	0,00386	0,00	26,78
		4,0	10,20	0,00399	0,00	26,44
		5,0	12,75	0,00412	0,00	25,92
40.0 descarga	Etapa 1	1,0	2,549	0,00365	0,000	23,376
		2,0	5,098	0,00378	0,000	23,275
		3,0	7,647	0,00393	0,000	22,847
		4,0	10,196	0,00408	0,001	22,290
		5,0	12,745	0,00425	0,001	21,762
7.0 descarga	Etapa 1	1,0	2,549	0,00371	0,000	14,955
		2,0	5,098	0,00392	0,000	14,672
		3,0	7,647	0,00416	0,001	14,204
		4,0	10,196	0,00441	0,001	13,730
		5,0	12,745	0,00468	0,001	13,255

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 16 M 3-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00041	3,03	7,35
		2,0	5,10	0,00077	5,44	7,04
		3,0	7,65	0,00118	7,95	6,72
		4,0	10,20	0,00163	10,47	6,38
		5,0	12,75	0,00213	12,94	6,05
	2	1,0	2,55	0,00041	2,99	7,29
		2,0	5,10	0,00077	5,37	6,92
		3,0	7,65	0,00119	7,90	6,59
		4,0	10,20	0,00165	10,42	6,28
		5,0	12,75	0,00211	12,78	6,01
	3	1,0	2,55	0,00042	3,02	7,11
		2,0	5,10	0,00079	5,41	6,83
		3,0	7,65	0,00121	7,92	6,52
		4,0	10,20	0,00167	10,50	6,23
		5,0	12,75	0,00215	12,98	6,00
15,0	1	1,0	2,55	0,00034	3,03	8,71
		2,0	5,10	0,00065	5,39	8,20
		3,0	7,65	0,00102	7,98	7,78
		4,0	10,20	0,00142	10,56	7,39
		5,0	12,75	0,00184	13,08	7,05
	2	1,0	2,55	0,00033	2,94	8,98
		2,0	5,10	0,00063	5,36	8,50
		3,0	7,65	0,00098	7,95	8,08
		4,0	10,20	0,00136	10,53	7,71
		5,0	12,75	0,00175	13,07	7,39
	3	1,0	2,55	0,00035	3,10	8,66
		2,0	5,10	0,00065	5,43	8,27
		3,0	7,65	0,00100	8,03	7,94
		4,0	10,20	0,00138	10,59	7,62
		5,0	12,75	0,00176	13,10	7,37
25,0	1	1,0	2,55	0,00028	3,08	10,82
		2,0	5,10	0,00054	5,58	10,19
		3,0	7,65	0,00084	8,15	9,64
		4,0	10,20	0,00116	10,73	9,15
		5,0	12,75	0,00151	13,31	8,71
	2	1,0	2,55	0,00025	2,95	11,88
		2,0	5,10	0,00049	5,55	11,19
		3,0	7,65	0,00075	8,10	10,67
		4,0	10,20	0,00105	10,72	10,17
		5,0	12,75	0,00137	13,38	9,68
	3	1,0	2,55	0,00026	3,11	12,23
		2,0	5,10	0,00050	5,64	11,49
		3,0	7,65	0,00076	8,22	10,98
		4,0	10,20	0,00104	10,83	10,55
		5,0	12,75	0,00135	13,43	10,12
40,0	1	1,0	2,55	0,00020	3,23	16,53
		2,0	5,10	0,00038	5,95	15,56
		3,0	7,65	0,00058	8,68	14,85
		4,0	10,20	0,00080	11,38	14,21
		5,0	12,75	0,00103	14,14	13,59
	2	1,0	2,55	0,00018	3,28	17,41
		2,0	5,10	0,00035	5,95	16,97
		3,0	7,65	0,00053	8,69	16,24
		4,0	10,20	0,00072	11,42	15,68
		5,0	12,75	0,00094	14,19	15,05
	3	1,0	2,55	0,00019	3,29	17,77
		2,0	5,10	0,00035	6,04	17,16
		3,0	7,65	0,00053	8,77	16,66
		4,0	10,20	0,00072	11,53	16,08
		5,0	12,75	0,00092	14,29	15,59

Fuente: elaboración propia.

Tabla 15. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 16 M 3-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	1	1,0	2,55	0,00015	3,54	23,47
		2,0	5,10	0,00028	6,32	22,59
		3,0	7,65	0,00042	9,22	21,85
		4,0	10,20	0,00058	12,14	21,12
		5,0	12,75	0,00074	15,09	20,46
	2	1,0	2,55	0,00014	3,56	24,75
		2,0	5,10	0,00027	6,39	23,95
		3,0	7,65	0,00040	9,34	23,23
		4,0	10,20	0,00054	12,28	22,64
		5,0	12,75	0,00069	15,28	22,00
	3	1,0	2,55	0,00013	3,44	25,79
		2,0	5,10	0,00025	6,32	24,75
		3,0	7,65	0,00039	9,32	23,97
		4,0	10,20	0,00053	12,34	23,37
		5,0	12,75	0,00067	15,31	22,80
90,0	1	1,0	2,55	0,00011	3,64	34,82
		2,0	5,10	0,00021	6,99	33,67
		3,0	7,65	0,00031	10,16	32,99
		4,0	10,20	0,00042	13,41	32,25
		5,0	12,75	0,00053	16,66	31,56
	2	1,0	2,55	0,00011	3,94	36,39
		2,0	5,10	0,00020	7,09	35,42
		3,0	7,65	0,00030	10,30	34,69
		4,0	10,20	0,00040	13,53	34,02
		5,0	12,75	0,00050	16,77	33,44
	3	1,0	2,55	0,00010	3,84	37,19
		2,0	5,10	0,00019	7,05	36,69
		3,0	7,65	0,00029	10,30	36,01
		4,0	10,20	0,00039	13,60	35,41
		5,0	12,75	0,00048	16,86	34,83
40.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00013	3,849	30,373
		2,0	5,098	0,00024	6,952	29,518
		3,0	7,647	0,00035	10,134	28,744
		4,0	10,196	0,00048	13,349	28,133
		5,0	12,745	0,00060	16,578	27,453
7.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00020	3,622	18,171
		2,0	5,098	0,00039	6,649	17,286
		3,0	7,647	0,00058	9,671	16,557
		4,0	10,196	0,00080	12,745	15,888
		5,0	12,745	0,00104	15,861	15,221

Fuente: elaboración propia.

Tabla 16. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS – 16 M 3-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00036	2,56	7,13
		2,0	5,10	0,00074	4,91	6,69
		3,0	7,65	0,00116	7,25	6,31
		4,0	10,20	0,00164	9,55	5,89
		5,0	12,75	0,00217	11,77	5,45
	2	1,0	2,55	0,00035	2,49	7,16
		2,0	5,10	0,00074	4,91	6,66
		3,0	7,65	0,00117	7,31	6,30
		4,0	10,20	0,00163	9,61	5,94
		5,0	12,75	0,00213	11,87	5,62
	3	1,0	2,55	0,00035	2,50	7,17
		2,0	5,10	0,00074	4,89	6,64
		3,0	7,65	0,00117	7,27	6,26
		4,0	10,20	0,00162	9,62	5,97
		5,0	12,75	0,00211	11,95	5,69
15,0	1	1,0	2,55	0,00029	2,57	8,83
		2,0	5,10	0,00061	5,06	8,20
		3,0	7,65	0,00097	7,54	7,75
		4,0	10,20	0,00135	9,95	7,36
		5,0	12,75	0,00177	12,30	6,97
	2	1,0	2,55	0,00029	2,55	8,90
		2,0	5,10	0,00060	5,02	8,33
		3,0	7,65	0,00096	7,54	7,90
		4,0	10,20	0,00134	10,01	7,51
		5,0	12,75	0,00173	12,36	7,15
	3	1,0	2,55	0,00029	2,57	8,74
		2,0	5,10	0,00061	5,09	8,26
		3,0	7,65	0,00097	7,61	7,85
		4,0	10,20	0,00134	10,03	7,48
		5,0	12,75	0,00175	12,40	7,12
25,0	1	1,0	2,55	0,00025	2,69	10,94
		2,0	5,10	0,00051	5,16	10,13
		3,0	7,65	0,00081	7,73	9,61
		4,0	10,20	0,00113	10,25	9,07
		5,0	12,75	0,00148	12,73	8,60
	2	1,0	2,55	0,00023	2,67	11,65
		2,0	5,10	0,00048	5,26	11,02
		3,0	7,65	0,00075	7,82	10,53
		4,0	10,20	0,00105	10,42	9,97
		5,0	12,75	0,00137	12,92	9,46
	3	1,0	2,55	0,00023	2,73	12,05
		2,0	5,10	0,00047	5,26	11,28
		3,0	7,65	0,00073	7,84	10,76
		4,0	10,20	0,00102	10,42	10,20
		5,0	12,75	0,00135	12,98	9,67
40,0	1	1,0	2,55	0,00018	2,94	16,15
		2,0	5,10	0,00037	5,64	15,50
		3,0	7,65	0,00057	8,34	14,83
		4,0	10,20	0,00079	11,06	14,15
		5,0	12,75	0,00103	13,79	13,46
	2	1,0	2,55	0,00016	2,88	17,11
		2,0	5,10	0,00033	5,60	16,72
		3,0	7,65	0,00052	8,39	16,20
		4,0	10,20	0,00073	11,24	15,46
		5,0	12,75	0,00095	13,99	14,72
	3	1,0	2,55	0,00017	2,92	17,38
		2,0	5,10	0,00033	5,68	16,99
		3,0	7,65	0,00051	8,42	16,57
		4,0	10,20	0,00071	11,24	15,91
		5,0	12,75	0,00092	14,03	15,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS – 16 M 3-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	1	1,0	2,55	0,00013	3,07	23,18
		2,0	5,10	0,00027	6,01	22,33
		3,0	7,65	0,00041	8,96	21,79
		4,0	10,20	0,00057	11,90	21,07
		5,0	12,75	0,00074	14,98	20,31
	2	1,0	2,55	0,00013	3,22	24,31
		2,0	5,10	0,00026	6,12	23,55
		3,0	7,65	0,00040	9,07	22,80
		4,0	10,20	0,00054	11,97	22,22
		5,0	12,75	0,00070	15,07	21,63
	3	1,0	2,55	0,00012	3,11	25,49
		2,0	5,10	0,00025	6,10	24,58
		3,0	7,65	0,00039	9,11	23,70
		4,0	10,20	0,00053	12,14	22,91
		5,0	12,75	0,00069	15,23	22,29
90,0	1	1,0	2,55	0,00009	3,33	34,45
		2,0	5,10	0,00020	6,66	33,65
		3,0	7,65	0,00030	9,88	33,05
		4,0	10,20	0,00041	13,13	32,58
		5,0	12,75	0,00052	16,40	31,77
	2	1,0	2,55	0,00010	3,58	35,86
		2,0	5,10	0,00019	6,76	35,51
		3,0	7,65	0,00029	10,01	34,63
		4,0	10,20	0,00039	13,30	33,70
		5,0	12,75	0,00050	16,55	33,03
	3	1,0	2,55	0,00009	3,48	36,90
		2,0	5,10	0,00019	6,77	36,84
		3,0	7,65	0,00027	9,97	36,17
		4,0	10,20	0,00037	13,34	35,65
		5,0	12,75	0,00048	16,62	34,86
40.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00011	3,470	29,333
		2,0	5,098	0,00023	6,655	28,602
		3,0	7,647	0,00035	9,829	28,095
		4,0	10,196	0,00049	13,071	27,216
		5,0	12,745	0,00062	16,312	26,417
7.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00018	3,206	18,020
		2,0	5,098	0,00036	6,263	17,368
		3,0	7,647	0,00057	9,347	16,703
		4,0	10,196	0,00078	12,427	15,878
		5,0	12,745	0,00103	15,548	15,072

Fuente: elaboración propia.

Tabla 18. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 18 M 3-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00015	3,00	19,42
		2,0	5,10	0,00029	5,43	18,87
		3,0	7,65	0,00044	7,97	18,17
		4,0	10,20	0,00060	10,49	17,43
		5,0	12,75	0,00079	12,96	16,59
	2	1,0	2,55	0,00016	2,97	18,30
		2,0	5,10	0,00030	5,37	17,73
		3,0	7,65	0,00046	7,90	17,24
		4,0	10,20	0,00063	10,44	16,55
		5,0	12,75	0,00082	13,00	15,88
	3	1,0	2,55	0,00016	2,94	18,19
		2,0	5,10	0,00031	5,36	17,49
		3,0	7,65	0,00047	7,87	16,88
		4,0	10,20	0,00064	10,34	16,29
		5,0	12,75	0,00083	12,87	15,62
15,0	1	1,0	2,55	0,00014	2,96	21,01
		2,0	5,10	0,00026	5,41	20,53
		3,0	7,65	0,00040	7,89	19,93
		4,0	10,20	0,00054	10,37	19,22
		5,0	12,75	0,00070	12,97	18,53
	2	1,0	2,55	0,00014	2,98	21,55
		2,0	5,10	0,00026	5,38	20,98
		3,0	7,65	0,00039	7,83	20,39
		4,0	10,20	0,00053	10,38	19,76
		5,0	12,75	0,00068	12,96	19,07
	3	1,0	2,55	0,00014	2,95	21,71
		2,0	5,10	0,00026	5,41	21,18
		3,0	7,65	0,00039	7,96	20,79
		4,0	10,20	0,00053	10,50	20,25
		5,0	12,75	0,00068	13,04	19,64
25,0	1	1,0	2,55	0,00013	3,07	23,74
		2,0	5,10	0,00023	5,58	24,08
		3,0	7,65	0,00035	8,15	23,65
		4,0	10,20	0,00047	10,74	23,00
		5,0	12,75	0,00060	13,29	22,35
	2	1,0	2,55	0,00012	3,05	25,01
		2,0	5,10	0,00022	5,56	25,35
		3,0	7,65	0,00033	8,20	24,91
		4,0	10,20	0,00045	10,79	24,31
		5,0	12,75	0,00057	13,42	23,66
	3	1,0	2,55	0,00012	3,02	25,15
		2,0	5,10	0,00022	5,67	25,69
		3,0	7,65	0,00033	8,26	25,29
		4,0	10,20	0,00044	10,90	24,87
		5,0	12,75	0,00056	13,51	24,34
40,0	1	1,0	2,55	0,00011	3,09	27,64
		2,0	5,10	0,00021	5,54	27,32
		3,0	7,65	0,00030	8,04	26,88
		4,0	10,20	0,00041	10,62	26,33
		5,0	12,75	0,00052	13,21	25,63
	2	1,0	2,55	0,00011	3,14	29,68
		2,0	5,10	0,00019	5,54	29,34
		3,0	7,65	0,00028	8,08	28,94
		4,0	10,20	0,00038	10,67	28,47
		5,0	12,75	0,00048	13,23	27,87
	3	1,0	2,55	0,00010	3,00	29,92
		2,0	5,10	0,00019	5,49	29,62
		3,0	7,65	0,00028	8,06	29,33
		4,0	10,20	0,00037	10,65	28,93
		5,0	12,75	0,00047	13,22	28,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla 19. Resultados del ensayo para obtener el módulo dinámico equivalente de Young (E_{eq}) de la muestra SS – 18 M 3-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo Dinámico		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo dinámico (E_{eq})
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	1	1,0	2,55	0,00009	3,12	33,74
		2,0	5,10	0,00017	5,58	33,43
		3,0	7,65	0,00025	8,15	33,12
		4,0	10,20	0,00034	10,80	32,47
		5,0	12,75	0,00042	13,39	32,11
	2	1,0	2,55	0,00009	3,05	35,26
		2,0	5,10	0,00016	5,64	35,11
		3,0	7,65	0,00024	8,16	34,87
		4,0	10,20	0,00032	10,76	34,41
		5,0	12,75	0,00040	13,50	33,90
	3	1,0	2,55	0,00008	3,01	36,31
		2,0	5,10	0,00015	5,59	36,07
		3,0	7,65	0,00023	8,22	35,79
		4,0	10,20	0,00031	10,79	35,27
		5,0	12,75	0,00039	13,46	34,96
90,0	1	1,0	2,55	0,00007	3,18	44,01
		2,0	5,10	0,00013	5,71	43,72
		3,0	7,65	0,00020	8,34	43,38
		4,0	10,20	0,00026	11,19	42,97
		5,0	12,75	0,00033	13,81	42,61
	2	1,0	2,55	0,00006	3,09	46,68
		2,0	5,10	0,00013	5,90	46,11
		3,0	7,65	0,00019	8,57	45,58
		4,0	10,20	0,00025	11,13	45,22
		5,0	12,75	0,00031	13,83	44,92
	3	1,0	2,55	0,00007	3,16	47,32
		2,0	5,10	0,00012	5,56	47,11
		3,0	7,65	0,00018	8,55	46,89
		4,0	10,20	0,00024	11,35	46,50
		5,0	12,75	0,00030	14,04	46,19
120,0	1	1,0	2,549	0,00005	3,470	66,689
		2,0	5,098	0,00010	6,315	65,983
		3,0	7,647	0,00014	8,986	64,959
		4,0	10,196	0,00018	11,693	64,217
		5,0	12,745	0,00023	14,518	63,482
	2	1,0	2,549	0,00005	3,502	68,083
		2,0	5,098	0,00009	6,410	67,519
		3,0	7,647	0,00013	9,091	67,096
		4,0	10,196	0,00017	11,651	66,597
		5,0	12,745	0,00022	14,640	65,860
40.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00005	3,470	66,689
		2,0	5,098	0,00010	6,315	65,983
		3,0	7,647	0,00014	8,986	64,959
		4,0	10,196	0,00018	11,693	64,217
		5,0	12,745	0,00023	14,518	63,482
7.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00006	3,595	53,546
		2,0	5,098	0,00011	6,213	52,921
		3,0	7,647	0,00017	8,905	52,410
		4,0	10,196	0,00022	11,652	51,775
		5,0	12,745	0,00028	14,376	51,097

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS-18 M 3-1.

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
7,0	1	1,0	2,55	0,00014	2,62	19,13
		2,0	5,10	0,00028	5,16	18,28
		3,0	7,65	0,00045	7,62	17,25
		4,0	10,20	0,00065	10,10	15,84
		5,0	12,75	0,00088	12,57	14,59
	2	1,0	2,55	0,00014	2,58	18,32
		2,0	5,10	0,00030	5,14	17,52
		3,0	7,65	0,00047	7,67	16,71
		4,0	10,20	0,00066	10,10	15,63
		5,0	12,75	0,00085	12,62	15,15
	3	1,0	2,55	0,00014	2,57	18,44
		2,0	5,10	0,00030	5,14	17,17
		3,0	7,65	0,00047	7,65	16,23
		4,0	10,20	0,00066	10,11	15,54
		5,0	12,75	0,00086	12,62	15,07
15,0	1	1,0	2,55	0,00012	2,60	21,23
		2,0	5,10	0,00026	5,19	20,24
		3,0	7,65	0,00039	7,76	19,70
		4,0	10,20	0,00055	10,30	18,83
		5,0	12,75	0,00072	12,84	18,07
	2	1,0	2,55	0,00013	2,61	21,46
		2,0	5,10	0,00026	5,20	20,65
		3,0	7,65	0,00040	7,76	19,89
		4,0	10,20	0,00055	10,31	19,12
		5,0	12,75	0,00070	12,88	18,40
	3	1,0	2,55	0,00012	2,59	21,58
		2,0	5,10	0,00025	5,20	20,72
		3,0	7,65	0,00039	7,72	20,01
		4,0	10,20	0,00054	10,29	19,15
		5,0	12,75	0,00070	12,83	18,45
25,0	1	1,0	2,55	0,00011	2,62	24,68
		2,0	5,10	0,00022	5,26	24,08
		3,0	7,65	0,00034	7,80	23,16
		4,0	10,20	0,00047	10,38	22,48
		5,0	12,75	0,00060	12,96	21,73
	2	1,0	2,55	0,00010	2,60	25,79
		2,0	5,10	0,00022	5,26	24,49
		3,0	7,65	0,00032	7,82	24,11
		4,0	10,20	0,00045	10,38	23,18
		5,0	12,75	0,00059	12,96	22,35
	3	1,0	2,55	0,00011	2,80	26,05
		2,0	5,10	0,00022	5,29	25,23
		3,0	7,65	0,00032	7,83	24,52
		4,0	10,20	0,00045	10,39	23,67
		5,0	12,75	0,00057	12,97	22,85
40,0	1	1,0	2,55	0,00010	2,62	28,36
		2,0	5,10	0,00020	5,32	27,23
		3,0	7,65	0,00030	7,87	26,77
		4,0	10,20	0,00041	10,47	25,94
		5,0	12,75	0,00052	13,04	25,22
	2	1,0	2,55	0,00009	2,71	29,59
		2,0	5,10	0,00018	5,35	29,38
		3,0	7,65	0,00028	7,90	28,52
		4,0	10,20	0,00038	10,49	28,12
		5,0	12,75	0,00049	13,08	27,18
	3	1,0	2,55	0,00009	2,63	30,53
		2,0	5,10	0,00018	5,34	29,92
		3,0	7,65	0,00027	7,84	29,00
		4,0	10,20	0,00037	10,50	28,35
		5,0	12,75	0,00048	13,07	27,70

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Resultados del ensayo para obtener el módulo resiliente (M_r) de la muestra SS – 18 M 3-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo medio (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	Esfuerzo axial máx ($\sigma_{máx}$)	Ensayo de Módulo resiliente		
				$\epsilon_{máx}$	$\sigma_{dmáx}$	Módulo resiliente (M_r)
kPa	Etapa	kg	kPa	mm/mm	kPa	MPa
60,0	1	1,0	2,55	0,00008	2,73	33,88
		2,0	5,10	0,00017	5,53	33,67
		3,0	7,65	0,00025	8,11	33,22
		4,0	10,20	0,00033	10,66	32,33
		5,0	12,75	0,00043	13,26	31,49
	2	1,0	2,55	0,00008	2,90	35,80
		2,0	5,10	0,00016	5,49	34,87
		3,0	7,65	0,00024	7,92	34,58
		4,0	10,20	0,00031	10,75	34,40
		5,0	12,75	0,00040	13,30	33,48
	3	1,0	2,55	0,00007	2,85	36,77
		2,0	5,10	0,00016	5,64	36,01
		3,0	7,65	0,00022	7,84	35,95
		4,0	10,20	0,00031	10,81	35,03
		5,0	12,75	0,00038	13,42	34,67
90,0	1	1,0	2,55	0,00007	2,98	44,82
		2,0	5,10	0,00014	5,91	44,48
		3,0	7,65	0,00018	8,23	44,24
		4,0	10,20	0,00027	11,35	43,50
		5,0	12,75	0,00033	13,97	42,80
	2	1,0	2,55	0,00007	3,09	46,99
		2,0	5,10	0,00013	6,03	46,60
		3,0	7,65	0,00018	8,65	46,46
		4,0	10,20	0,00024	11,20	46,05
		5,0	12,75	0,00032	14,36	45,18
	3	1,0	2,55	0,00007	3,14	48,67
		2,0	5,10	0,00013	6,09	47,92
		3,0	7,65	0,00018	8,62	47,30
		4,0	10,20	0,00028	11,43	46,34
		5,0	12,75	0,00038	14,36	45,75
120,0	1	1,0	2,549	0,00005	3,090	69,359
		2,0	5,098	0,00008	5,780	68,209
		3,0	7,647	0,00014	8,912	67,196
		4,0	10,196	0,00018	11,528	66,271
		5,0	12,745	0,00022	14,042	65,246
	2	1,0	2,549	0,00004	3,103	71,005
		2,0	5,098	0,00008	5,777	70,414
		3,0	7,647	0,00013	8,979	69,763
		4,0	10,196	0,00017	11,786	69,086
		5,0	12,745	0,00021	14,173	68,507
40.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00007	4,156	59,197
		2,0	5,098	0,00013	7,790	57,962
		3,0	7,647	0,00019	11,147	58,802
		4,0	10,196	0,00026	14,719	56,921
		5,0	12,745	0,00033	18,304	56,174
7.0 descarga	1	1,0	2,549	0,00005	3,045	55,592
		2,0	5,098	0,00009	5,576	54,738
		3,0	7,647	0,00016	8,601	53,854
		4,0	10,196	0,00022	11,356	52,941
		5,0	12,745	0,00027	14,094	52,035

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Comparación en porcentajes de los módulos (Eeq y Mr) para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación.

Tabla 22. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS - 22 M 2-1.

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P) kg	SS-22			
			E _{eq}	M _r	% E _{eq}	% M _r
7,0	1	1,0	10,47	10,34		
		2,0	9,79	9,55		
		3,0	9,45	8,23		
		4,0	8,97	8,03		
		5,0	8,19	7,86		
	2	1,0	10,20	9,77	-2,54	-5,52
		2,0	9,53	9,28	-2,67	-2,83
		3,0	9,23	8,74	-2,30	6,15
		4,0	8,79	8,29	-2,04	3,21
		5,0	7,95	8,04	-2,98	2,32
	3	1,0	10,09	10,01	-3,59	-3,16
		2,0	9,45	9,43	-3,49	-1,29
		3,0	9,17	9,10	-2,94	10,51
		4,0	8,67	8,75	-3,38	8,89
		5,0	8,05	8,44	-1,71	7,35
15,0	1	1,0	11,32	11,92		
		2,0	10,13	11,37		
		3,0	9,89	10,95		
		4,0	9,67	10,53		
		5,0	9,51	10,10		
	2	1,0	11,65	11,84	2,89	-0,63
		2,0	11,18	11,36	10,37	-0,07
		3,0	10,78	10,99	9,03	0,36
		4,0	10,49	10,56	8,43	0,23
		5,0	9,98	10,12	5,00	0,19
	3	1,0	12,77	13,03	12,84	9,32
		2,0	11,83	11,97	16,77	5,33
		3,0	11,34	11,40	14,74	4,19
		4,0	10,95	10,99	13,28	4,35
		5,0	10,30	10,57	8,33	4,59
25,0	1	1,0	13,58	13,44		
		2,0	13,22	13,01		
		3,0	12,78	12,70		
		4,0	12,45	12,38		
		5,0	12,11	12,01		
	2	1,0	14,81	14,20	9,05	5,71
		2,0	14,41	13,82	9,02	6,26
		3,0	14,02	13,51	9,73	6,40
		4,0	13,52	13,25	8,62	7,02
		5,0	13,11	12,86	8,31	7,08
	3	1,0	16,04	15,99	18,11	19,02
		2,0	15,35	15,37	16,10	18,14
		3,0	14,82	14,80	15,98	16,49
		4,0	14,20	14,31	14,08	15,60
		5,0	13,77	13,81	13,71	14,96
40,0	1	1,0	20,38	19,66		
		2,0	19,82	19,32		
		3,0	19,16	18,92		
		4,0	18,53	18,33		
		5,0	17,92	17,81		
	2	1,0	20,81	20,77	2,12	5,62
		2,0	20,43	19,64	3,12	1,63
		3,0	19,71	19,16	2,88	1,27
		4,0	18,92	18,75	2,11	2,27
		5,0	18,59	18,14	3,71	1,86
	3	1,0	21,30	21,39	4,53	8,77
		2,0	20,75	20,62	4,73	6,74
		3,0	20,21	20,15	5,47	6,50
		4,0	19,76	19,57	6,60	6,75
		5,0	19,29	18,61	7,64	4,49

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS - 22 M 2-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-22			
		kg	E_{eq}	M_r	% E_{eq}	% M_r
60,0	1	1,0	26,64	26,51		
		2,0	26,13	26,28		
		3,0	25,63	25,78		
		4,0	24,99	25,08		
		5,0	24,29	24,31		
	2	1,0	27,46	27,66	3,10	4,34
		2,0	27,03	27,00	3,44	2,72
		3,0	26,52	26,30	3,47	2,02
		4,0	25,94	25,60	3,79	2,11
		5,0	25,34	25,11	4,35	3,30
	3	1,0	28,67	29,59	7,63	11,60
		2,0	28,20	28,92	7,93	10,05
		3,0	27,51	28,16	7,33	9,24
		4,0	26,69	27,38	6,80	9,17
		5,0	26,02	26,43	7,13	8,73
90,0	1	1,0	40,77	40,35		
		2,0	40,13	39,59		
		3,0	39,45	39,31		
		4,0	38,70	38,70		
		5,0	37,92	37,78		
	2	1,0	41,65	41,64	2,15	3,18
		2,0	40,97	41,14	2,08	3,91
		3,0	40,25	40,77	2,02	3,72
		4,0	39,50	40,08	2,07	3,56
		5,0	39,00	39,34	2,85	4,13
	3	1,0	42,83	42,48	5,05	5,28
		2,0	42,05	42,05	4,78	6,20
		3,0	41,26	41,51	4,59	5,60
		4,0	40,53	40,92	4,75	5,74
		5,0	39,88	40,37	5,16	6,85
120,0	1	1,0	51,47	59,34		
		2,0	50,06	58,11		
		3,0	49,02	57,01		
		4,0	47,75	55,86		
		5,0	46,64	54,36		
	2	1,0	53,58	61,59	4,10	3,79
		2,0	52,40	60,75	4,67	4,55
		3,0	51,16	59,81	4,36	4,91
		4,0	50,31	58,37	5,37	4,49
		5,0	49,22	57,34	5,54	5,48
	3	1,0	54,47	63,57	5,82	7,13
		2,0	52,97	62,43	5,81	7,43
		3,0	52,16	61,38	6,42	7,66
		4,0	51,40	59,23	7,64	6,03
		5,0	50,51	58,85	8,30	8,26
40.0 descarga	1	1,0	52,20	53,02	156,16	169,64
		2,0	51,11	52,28	157,95	170,59
		3,0	49,79	51,11	159,93	170,13
		4,0	48,50	48,85	161,72	166,45
		5,0	47,16	47,92	163,10	169,07
7.0 descarga	1	1,0	43,33	44,61	314,03	331,59
		2,0	41,87	43,14	327,58	351,53
		3,0	41,04	42,10	334,40	411,30
		4,0	39,93	40,79	345,00	407,71
		5,0	38,94	39,54	375,26	403,20

Fuente: elaboración propia.

Tabla 24. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS-19 M 2-1.

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-19			
		kg	E _{eq}	M _r	% E _{eq}	% M _r
7,0	1	1,0	6,22	6,26		
		2,0	6,10	6,07		
		3,0	5,93	5,89		
		4,0	5,74	5,64		
		5,0	5,56	5,39		
	2	1,0	6,20	6,26	-0,28	-0,01
		2,0	6,00	6,00	-1,63	-1,13
		3,0	5,83	5,77	-1,61	-1,98
		4,0	5,43	5,58	-5,39	-1,06
		5,0	5,31	5,39	-4,49	0,00
	3	1,0	6,16	6,32	-1,01	1,01
		2,0	5,98	6,00	-2,04	-1,12
		3,0	5,79	5,77	-2,41	-1,92
		4,0	5,60	5,58	-2,51	-1,02
		5,0	5,44	5,38	-2,10	-0,29
15,0	1	1,0	6,79	6,80		
		2,0	6,57	6,62		
		3,0	6,36	6,42		
		4,0	6,14	6,19		
		5,0	5,94	5,98		
	2	1,0	6,86	7,04	0,93	3,62
		2,0	6,64	6,75	1,07	1,99
		3,0	6,43	6,52	1,21	1,57
		4,0	6,23	6,31	1,37	1,87
		5,0	6,01	6,11	1,19	2,07
	3	1,0	6,97	7,15	2,61	5,25
		2,0	6,74	6,82	2,69	3,02
		3,0	6,51	6,57	2,51	2,41
		4,0	6,30	6,33	2,56	2,24
		5,0	6,10	6,12	2,77	2,28
25,0	1	1,0	7,49	7,73		
		2,0	7,28	7,37		
		3,0	7,06	7,11		
		4,0	6,84	6,85		
		5,0	6,61	6,60		
	2	1,0	7,77	7,93	3,71	2,48
		2,0	7,51	7,60	3,21	3,09
		3,0	7,29	7,32	3,26	3,04
		4,0	7,08	7,07	3,56	3,24
		5,0	6,88	6,82	4,04	3,23
	3	1,0	7,92	7,93	5,75	2,56
		2,0	7,76	7,78	6,64	5,58
		3,0	7,58	7,55	7,38	6,21
		4,0	7,40	7,30	8,14	6,63
		5,0	7,20	7,05	8,91	6,81
40,0	1	1,0	10,74	10,88		
		2,0	10,60	10,72		
		3,0	10,43	10,45		
		4,0	10,22	10,16		
		5,0	10,00	9,87		
	2	1,0	11,44	11,53	6,48	5,95
		2,0	11,24	11,35	6,10	5,87
		3,0	11,04	11,07	5,91	5,93
		4,0	10,83	10,74	5,92	5,68
		5,0	10,60	10,43	6,07	5,71
	3	1,0	11,93	11,96	11,05	9,92
		2,0	11,72	11,74	10,55	9,57
		3,0	11,50	11,49	10,32	9,94
		4,0	11,21	11,18	9,63	10,00
		5,0	11,02	10,88	10,23	10,24

Fuente: elaboración propia.

Tabla 25. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS-19 M 2-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-19			
		kg	E_{eq}	M_r	% E_{eq}	% M_r
60,0	1	1,0	16,84	16,80		
		2,0	16,54	16,75		
		3,0	16,35	16,41		
		4,0	16,12	16,08		
		5,0	15,87	15,71		
	2	1,0	17,39	17,78	3,26	5,84
		2,0	17,15	17,35	3,64	3,59
		3,0	16,94	17,03	3,58	3,78
		4,0	16,71	16,72	3,65	3,96
		5,0	16,44	16,28	3,62	3,58
	3	1,0	17,73	18,03	5,29	7,30
		2,0	17,54	17,77	6,01	6,10
		3,0	17,30	17,39	5,76	6,00
		4,0	17,11	16,91	6,18	5,15
		5,0	16,85	16,52	6,16	5,16
90,0	1	1,0	25,45	25,79		
		2,0	25,25	25,28		
		3,0	25,15	25,05		
		4,0	24,94	24,63		
		5,0	24,68	24,27		
	2	1,0	27,07	26,78	6,39	3,85
		2,0	26,46	25,93	4,79	2,58
		3,0	26,17	25,88	4,03	3,29
		4,0	25,86	25,39	3,66	3,08
		5,0	25,57	25,13	3,60	3,55
	3	1,0	27,80	27,75	9,25	7,59
		2,0	27,19	26,95	7,71	6,62
		3,0	26,87	26,78	6,80	6,89
		4,0	26,57	26,44	6,52	7,32
		5,0	26,26	25,92	6,39	6,79
40.0 descarga	1	1,0	23,40	23,38	117,77	114,83
		2,0	23,05	23,28	117,53	117,20
		3,0	22,67	22,85	117,45	118,69
		4,0	22,37	22,29	118,74	119,29
		5,0	22,06	21,76	120,70	120,47
7.0 descarga	1	1,0	14,90	14,96	139,51	138,87
		2,0	14,56	14,67	138,58	141,88
		3,0	14,25	14,20	140,24	141,35
		4,0	13,88	13,73	141,65	143,45
		5,0	13,54	13,26	143,73	145,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS – 16 M 3-1.

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-16			
		kg	E _{eq}	M _r	% E _{eq}	% M _r
7,0	1	1,0	7,35	7,13		
		2,0	7,04	6,69		
		3,0	6,72	6,31		
		4,0	6,38	5,89		
		5,0	6,05	5,45		
	2	1,0	7,29	7,16	-0,90	0,43
		2,0	6,92	6,66	-1,68	-0,47
		3,0	6,59	6,30	-2,02	-0,27
		4,0	6,28	5,94	-1,62	0,91
		5,0	6,01	5,62	-0,54	3,01
	3	1,0	7,11	7,17	-3,34	0,50
		2,0	6,83	6,64	-2,94	-0,68
		3,0	6,52	6,26	-3,03	-0,79
		4,0	6,23	5,97	-2,31	1,39
		5,0	6,00	5,69	-0,83	4,26
15,0	1	1,0	8,71	8,83		
		2,0	8,20	8,20		
		3,0	7,78	7,75		
		4,0	7,39	7,36		
		5,0	7,05	6,97		
	2	1,0	8,98	8,90	3,04	0,81
		2,0	8,50	8,33	3,64	1,58
		3,0	8,08	7,90	3,86	1,92
		4,0	7,71	7,51	4,36	2,06
		5,0	7,39	7,15	4,92	2,56
	3	1,0	8,66	8,74	-0,65	-1,04
		2,0	8,27	8,26	0,90	0,73
		3,0	7,94	7,85	2,15	1,19
		4,0	7,62	7,48	3,11	1,57
		5,0	7,37	7,12	4,64	2,06
25,0	1	1,0	10,82	10,94		
		2,0	10,19	10,13		
		3,0	9,64	9,61		
		4,0	9,15	9,07		
		5,0	8,71	8,60		
	2	1,0	11,88	11,65	9,79	6,54
		2,0	11,19	11,02	9,84	8,81
		3,0	10,67	10,53	10,67	9,55
		4,0	10,17	9,97	11,11	9,87
		5,0	9,68	9,46	11,16	9,90
	3	1,0	12,23	12,05	13,03	10,14
		2,0	11,49	11,28	12,82	11,36
		3,0	10,98	10,76	13,90	11,95
		4,0	10,55	10,20	15,32	12,49
		5,0	10,12	9,67	16,23	12,43
40,0	1	1,0	16,53	16,15		
		2,0	15,56	15,50		
		3,0	14,85	14,83		
		4,0	14,21	14,15		
		5,0	13,59	13,46		
	2	1,0	17,41	17,11	5,31	5,92
		2,0	16,97	16,72	9,03	7,84
		3,0	16,24	16,20	9,38	9,23
		4,0	15,68	15,46	10,33	9,22
		5,0	15,05	14,72	10,78	9,33
	3	1,0	17,77	17,38	7,50	7,64
		2,0	17,16	16,99	10,27	9,59
		3,0	16,66	16,57	12,21	11,74
		4,0	16,08	15,91	13,19	12,44
		5,0	15,59	15,29	14,68	13,56

Fuente: elaboración propia.

Tabla 27. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS – 16 M 3-1 (Continuación).

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-16			
		kg	E _{eq}	M _r	% E _{eq}	% M _r
60,0	1	1,0	23,47	23,18		
		2,0	22,59	22,33		
		3,0	21,85	21,79		
		4,0	21,12	21,07		
		5,0	20,46	20,31		
	2	1,0	24,75	24,31	5,46	4,90
		2,0	23,95	23,55	6,01	5,46
		3,0	23,23	22,80	6,33	4,64
		4,0	22,64	22,22	7,19	5,46
		5,0	22,00	21,63	7,53	6,49
	3	1,0	25,79	25,49	9,90	9,95
		2,0	24,75	24,58	9,54	10,09
		3,0	23,97	23,70	9,73	8,74
		4,0	23,37	22,91	10,67	8,73
		5,0	22,80	22,29	11,47	9,70
90,0	1	1,0	34,82	34,45		
		2,0	33,67	33,65		
		3,0	32,99	33,05		
		4,0	32,25	32,58		
		5,0	31,56	31,77		
	2	1,0	36,39	35,86	4,50	4,11
		2,0	35,42	35,51	5,19	5,53
		3,0	34,69	34,63	5,13	4,79
		4,0	34,02	33,70	5,50	3,43
		5,0	33,44	33,03	5,96	3,97
	3	1,0	37,19	36,90	6,81	7,12
		2,0	36,69	36,84	8,96	9,48
		3,0	36,01	36,17	9,15	9,44
		4,0	35,41	35,65	9,79	9,41
		5,0	34,83	34,86	10,38	9,71
40.0 descarga	1	1,0	30,37	29,33	83,76	81,63
		2,0	29,52	28,60	89,66	84,53
		3,0	28,74	28,10	93,60	89,41
		4,0	28,13	27,22	97,99	92,31
		5,0	27,45	26,42	102,01	96,21
7.0 descarga	1	1,0	18,17	18,02	147,09	152,74
		2,0	17,29	17,37	145,48	159,63
		3,0	16,56	16,70	146,22	164,54
		4,0	15,89	15,88	149,02	169,71
		5,0	15,22	15,07	151,73	176,41

Fuente: elaboración propia.

Tabla 28. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS-18 M 3-1.

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-18			
		kg	E_{eq}	M_r	% E_{eq}	% M_r
7,0	1	1,0	19,42	19,13		
		2,0	18,87	18,28		
		3,0	18,17	17,25		
		4,0	17,43	15,84		
		5,0	16,59	14,59		
	2	1,0	19,05	18,32	-1,91	-4,23
		2,0	18,46	17,52	-2,16	-4,15
		3,0	17,96	16,71	-1,18	-3,14
		4,0	17,11	15,63	-1,84	-1,33
		5,0	16,23	15,15	-2,20	3,85
	3	1,0	19,30	18,44	-0,62	-3,62
		2,0	18,56	17,17	-1,63	-6,06
		3,0	17,92	16,23	-1,40	-5,90
		4,0	17,16	15,54	-1,55	-1,93
		5,0	16,43	15,07	-0,99	3,30
15,0	1	1,0	21,01	21,23		
		2,0	20,53	20,24		
		3,0	19,93	19,70		
		4,0	19,22	18,83		
		5,0	18,53	18,07		
	2	1,0	21,55	21,46	2,59	1,09
		2,0	20,98	20,65	2,22	2,00
		3,0	20,39	19,89	2,32	0,97
		4,0	19,76	19,12	2,83	1,56
		5,0	19,07	18,40	2,90	1,87
	3	1,0	21,71	21,58	3,32	1,63
		2,0	21,18	20,72	3,17	2,37
		3,0	20,79	20,01	4,31	1,56
		4,0	20,25	19,15	5,39	1,75
		5,0	19,64	18,45	6,00	2,11
25,0	1	1,0	23,74	24,68		
		2,0	24,08	24,08		
		3,0	23,65	23,16		
		4,0	23,00	22,48		
		5,0	22,35	21,73		
	2	1,0	25,01	25,79	5,31	4,50
		2,0	25,35	24,49	5,26	1,71
		3,0	24,91	24,11	5,33	4,08
		4,0	24,31	23,18	5,69	3,11
		5,0	23,66	22,35	5,84	2,89
	3	1,0	25,15	26,05	5,90	5,58
		2,0	25,69	25,23	6,66	4,78
		3,0	25,29	24,52	6,95	5,84
		4,0	24,87	23,67	8,09	5,31
		5,0	24,34	22,85	8,87	5,17
40,0	1	1,0	27,64	28,36		
		2,0	27,32	27,23		
		3,0	26,88	26,77		
		4,0	26,33	25,94		
		5,0	25,63	25,22		
	2	1,0	29,68	29,59	7,35	4,37
		2,0	29,34	29,38	7,40	7,88
		3,0	28,94	28,52	7,65	6,53
		4,0	28,47	28,12	8,13	8,42
		5,0	27,87	27,18	8,73	7,80
	3	1,0	29,92	30,53	8,23	7,68
		2,0	29,62	29,92	8,45	9,89
		3,0	29,33	29,00	9,11	8,30
		4,0	28,93	28,35	9,87	9,32
		5,0	28,49	27,70	11,14	9,87

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. Comparación en porcentajes de los módulos obtenidos de las muestras SS-18 M 3-1.
(Continuación).

Esfuerzo efectivo aplicado (σ')	Etapa de consolidación	Carga axial (P)	SS-18			
		kg	E_{eq}	M_r	% E_{eq}	% M_r
60,0	1	1,0	33,74	33,88		
		2,0	33,43	33,67		
		3,0	33,12	33,22		
		4,0	32,47	32,33		
		5,0	32,11	31,49		
	2	1,0	35,26	35,80	4,52	5,65
		2,0	35,11	34,87	5,04	3,58
		3,0	34,87	34,58	5,30	4,10
		4,0	34,41	34,40	5,98	6,38
		5,0	33,90	33,48	5,55	6,32
	3	1,0	36,31	36,77	7,63	8,52
		2,0	36,07	36,01	7,91	6,96
		3,0	35,79	35,95	8,07	8,22
		4,0	35,27	35,03	8,62	8,34
		5,0	34,96	34,67	8,87	10,09
90,0	1	1,0	44,01	44,82		
		2,0	43,72	44,48		
		3,0	43,38	44,24		
		4,0	42,97	43,50		
		5,0	42,61	42,80		
	2	1,0	46,68	46,99	6,07	4,84
		2,0	46,11	46,60	5,46	4,77
		3,0	45,58	46,46	5,06	5,01
		4,0	45,22	46,05	5,24	5,86
		5,0	44,92	45,18	5,44	5,55
	3	1,0	47,32	48,67	7,52	8,59
		2,0	47,11	47,92	7,75	7,72
		3,0	46,89	47,30	8,07	6,92
		4,0	46,50	46,34	8,22	6,53
		5,0	46,19	45,75	8,39	6,89
120,0	1	1,0	66,69	69,36		
		2,0	65,98	68,21		
		3,0	64,96	67,20		
		4,0	64,22	66,27		
		5,0	63,48	65,25		
	2	1,0	68,08	71,00	2,09	2,37
		2,0	67,52	70,41	2,33	3,23
		3,0	67,10	69,76	3,29	3,82
		4,0	66,60	69,09	3,71	4,25
		5,0	65,86	68,51	3,75	5,00
40.0 descarga	1	1,0	53,55	55,59	93,70	96,05
		2,0	52,92	54,74	93,74	101,01
		3,0	52,41	53,85	94,96	101,15
		4,0	51,78	52,94	96,66	104,10
		5,0	51,10	52,04	99,33	106,36
7.0 descarga	1	1,0	33,96	34,88	74,84	82,31
		2,0	33,23	34,32	76,11	87,75
		3,0	32,51	33,26	78,87	92,84
		4,0	31,84	32,22	82,68	103,35
		5,0	31,11	31,14	87,49	113,43

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Cambios volumétricos (ΔV) y relación de vacíos (e) de las muestras ensayadas para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en su respectiva etapa de consolidación.

Tabla 30. Cambios volumétricos (ΔV) y relación de vacíos (e) de la muestra SS-22 M 2-1 para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación.

Esfuerzo efectivo aplicado	Etapa de consolidación	Cambio de volumen	Cambio de volumen acumulado	Cambio de volumen de la probeta	Cambio vacíos por etapas	Relación de vacíos acumulada
σ' (kPa)		ΔV (cm ³)	ΔV_{ac} (cm ³)	ΔV_p (cm ³)	Δe	e_{ac}
		0,000	0,000	577,268	0,000	7,943
7,0	1	0,317	0,317	576,950	0,005	7,938
	2	-0,329	-0,011	577,279	0,000	7,943
	3	0,766	0,755	576,513	0,012	7,931
15,0	1	0,000	0,755	576,512	0,012	7,931
	2	0,600	1,355	575,913	0,021	7,922
	3	0,792	2,147	575,121	0,033	7,910
25,0	1	5,816	7,963	569,305	0,123	7,820
	2	1,069	9,032	568,235	0,140	7,803
	3	1,830	10,863	566,405	0,168	7,775
40,0	1	13,698	24,560	552,707	0,380	7,563
	2	1,720	26,280	550,987	0,407	7,536
	3	1,097	27,377	549,891	0,424	7,519
60,0	1	24,452	51,830	525,438	0,803	7,140
	2	2,911	54,741	522,527	0,848	7,095
	3	2,807	57,548	519,720	0,892	7,052
90,0	1	60,260	117,808	459,460	1,825	6,118
	2	2,778	120,585	456,682	1,868	6,075
	3	2,670	123,256	454,012	1,909	6,034
120,0	1	36,111	159,367	417,901	2,469	5,474
	2	2,250	161,617	415,651	2,504	5,439
	3	1,762	163,379	413,889	2,531	5,412
40,0 descarga	1	-3,074	160,305	416,962	2,483	5,460
07,0 descarga	1	-6,966	153,340	423,928	2,376	5,568
$\sigma'_p =$	46 kPa					

Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Cambios volumétricos (ΔV) y relación de vacíos (e) de la muestra SS-19 M 2-1 para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación.

Esfuerzo efectivo aplicado	Etapas de consolidación	Cambio de volumen	Cambio de volumen acumulado	Cambio de volumen de la probeta	Cambio vacíos por etapas	Relación de vacíos acumulada
σ' (kPa)		ΔV (cm ³)	ΔV_{ac} (cm ³)	ΔV_p (cm ³)	Δe	e_{ac}
		0,000	0,000	579,053	0,000	8,975
7,0	1	0,283	0,283	578,770	0,005	8,970
	2	0,134	0,417	578,636	0,007	8,968
	3	0,120	0,537	578,517	0,009	8,966
15,0	1	1,733	2,270	576,783	0,039	8,936
	2	0,579	2,849	576,204	0,049	8,926
	3	0,410	3,260	575,794	0,056	8,919
25,0	1	2,640	5,900	573,153	0,102	8,873
	2	1,937	7,837	571,216	0,135	8,840
	3	3,030	10,867	568,186	0,187	8,788
40,0	1	30,592	41,459	537,594	0,714	8,261
	2	3,319	44,778	534,275	0,771	8,204
	3	2,584	47,363	531,691	0,816	8,159
60,0	1	35,371	82,734	496,319	1,425	7,550
	2	2,703	85,437	493,617	1,472	7,503
	3	0,638	86,075	492,978	1,483	7,492
90,0	1	34,819	120,894	458,159	2,083	6,893
	2	1,897	122,791	456,262	2,115	6,860
	3	1,188	123,979	455,074	2,136	6,839
40,0 descarga	1	-4,735	119,244	459,809	2,054	6,921
07,0 descarga	1	-17,315	101,930	477,124	1,756	7,219
$\sigma'_p =$	24 kPa					

Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Cambios volumétricos (ΔV) y relación de vacíos (e) de la muestra SS-16 M 3-1 para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación.

Esfuerzo efectivo aplicado	Etapas de consolidación	Cambio de volumen	Cambio de volumen acumulado	Cambio de volumen de la probeta	Cambio vacíos por etapas	Relación de vacíos acumulada
σ' (kPa)		ΔV (cm ³)	ΔV_{ac} (cm ³)	ΔV_p (cm ³)	Δe	e_{ac}
		0,000	0,000	576,553	0,000	8,099
7,0	1	0,137	0,137	576,415	0,002	8,097
	2	0,329	0,466	576,086	0,007	8,092
	3	0,180	0,647	575,906	0,010	8,089
15,0	1	3,868	4,515	572,038	0,071	8,028
	2	0,555	5,070	571,483	0,080	8,019
	3	0,253	5,323	571,230	0,084	8,015
25,0	1	7,207	12,530	564,022	0,198	7,901
	2	3,747	16,278	560,275	0,257	7,842
	3	1,927	18,205	558,348	0,287	7,812
40,0	1	25,717	43,921	532,631	0,693	7,406
	2	5,715	49,637	526,916	0,783	7,316
	3	2,486	52,122	524,430	0,823	7,277
60,0	1	29,640	81,762	494,790	1,290	6,809
	2	5,588	87,350	489,202	1,379	6,721
	3	2,934	90,285	486,268	1,425	6,674
90,0	1	36,712	126,996	449,557	2,004	6,095
	2	3,696	130,692	445,861	2,063	6,037
	3	2,390	133,081	443,471	2,100	5,999
40,0 descarga	1	-6,762	126,319	450,233	1,994	6,106
07,0 descarga	1	-19,168	107,152	469,401	1,691	6,408
$\sigma'_p =$	29 kPa					

Fuente: elaboración propia

Tabla 33. Cambios volumétricos (ΔV) y relación de vacíos (e) de la muestra SS-18 M 3-1 para cada uno de los esfuerzos efectivos aplicados y en sus respectivas etapas de consolidación.

Esfuerzo efectivo aplicado	Etapas de consolidación	Cambio de volumen	Cambio de volumen acumulado	Cambio de volumen de la probeta	Cambio vacíos por etapas	Relación de vacíos acumulada
σ' (kPa)		ΔV (cm ³)	ΔV_{ac} (cm ³)	ΔV_p (cm ³)	Δe	e_{ac}
		0,000	0,000	562,921	0,000	3,051
7,0	1	0,193	0,193	562,727	0,001	3,049
	2	-0,020	0,173	562,748	0,001	3,050
	3	0,053	0,226	562,695	0,002	3,049
15,0	1	1,425	1,650	561,271	0,012	3,039
	2	0,059	1,709	561,212	0,012	3,039
	3	-0,169	1,540	561,381	0,011	3,040
25,0	1	1,652	3,193	559,728	0,023	3,028
	2	0,287	3,480	559,441	0,025	3,026
	3	0,091	3,571	559,350	0,026	3,025
40,0	1	2,733	6,304	556,617	0,045	3,006
	2	0,840	7,144	555,777	0,051	2,999
	3	0,218	7,362	555,559	0,053	2,998
60,0	1	6,791	14,153	548,768	0,102	2,949
	2	0,991	15,144	547,777	0,109	2,942
	3	0,486	15,630	547,291	0,112	2,938
90,0	1	15,066	30,696	532,225	0,221	2,830
	2	1,740	32,436	530,485	0,233	2,817
	3	0,864	33,300	529,621	0,240	2,811
120,0	1	12,394	45,694	517,227	0,329	2,722
	2	4,314	50,008	512,913	0,365	2,686
40,0 descarga	1	-5,398	45,340	517,581	0,326	2,725
07,0 descarga	1	-9,490	35,850	527,071	0,258	2,793
$\sigma'_p =$	40 kPa					

Fuente: elaboración propia

Apéndice 5. Cambio volumétrico (ΔV) vs tiempo (t) de las muestras ensayadas.

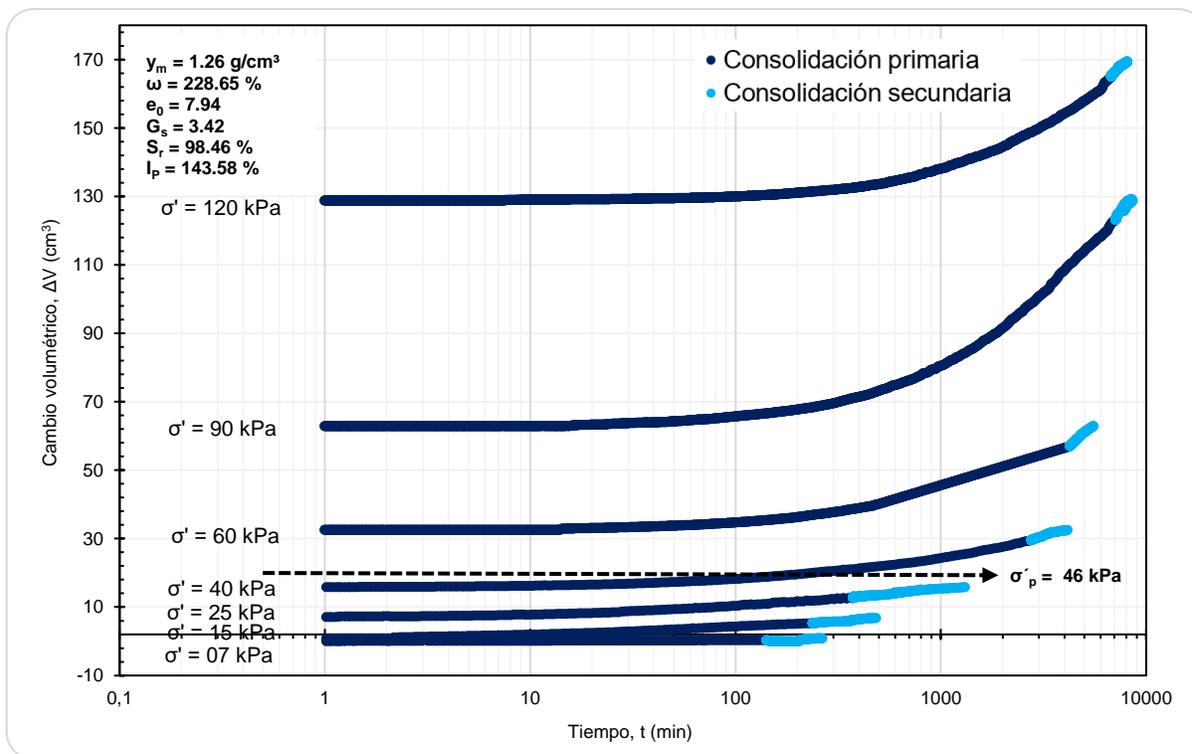


Figura 91. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia

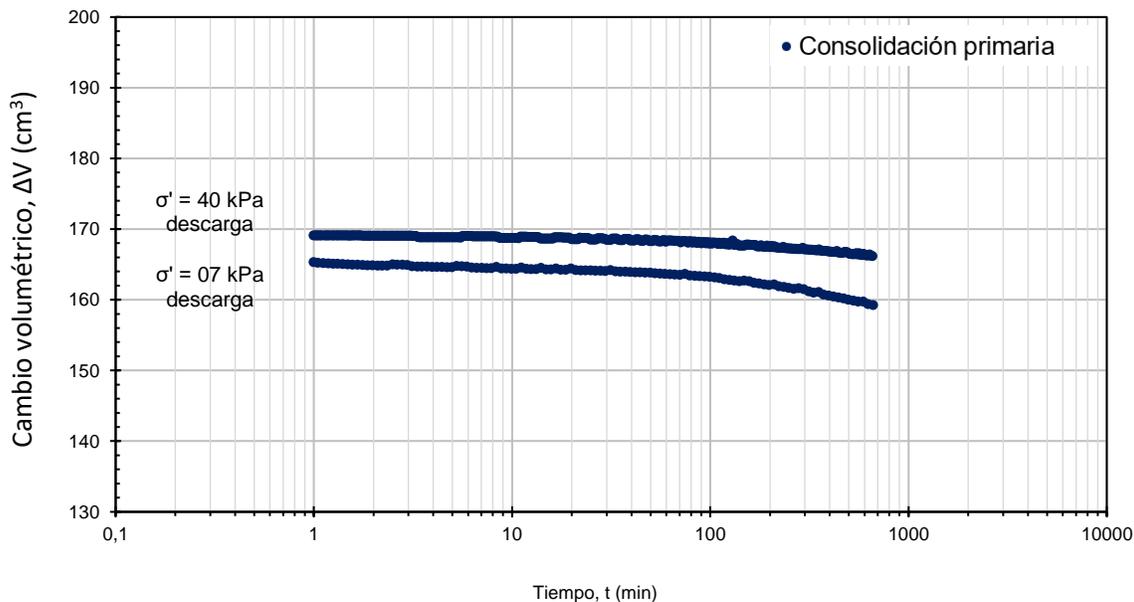


Figura 92. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-22 M 2-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia

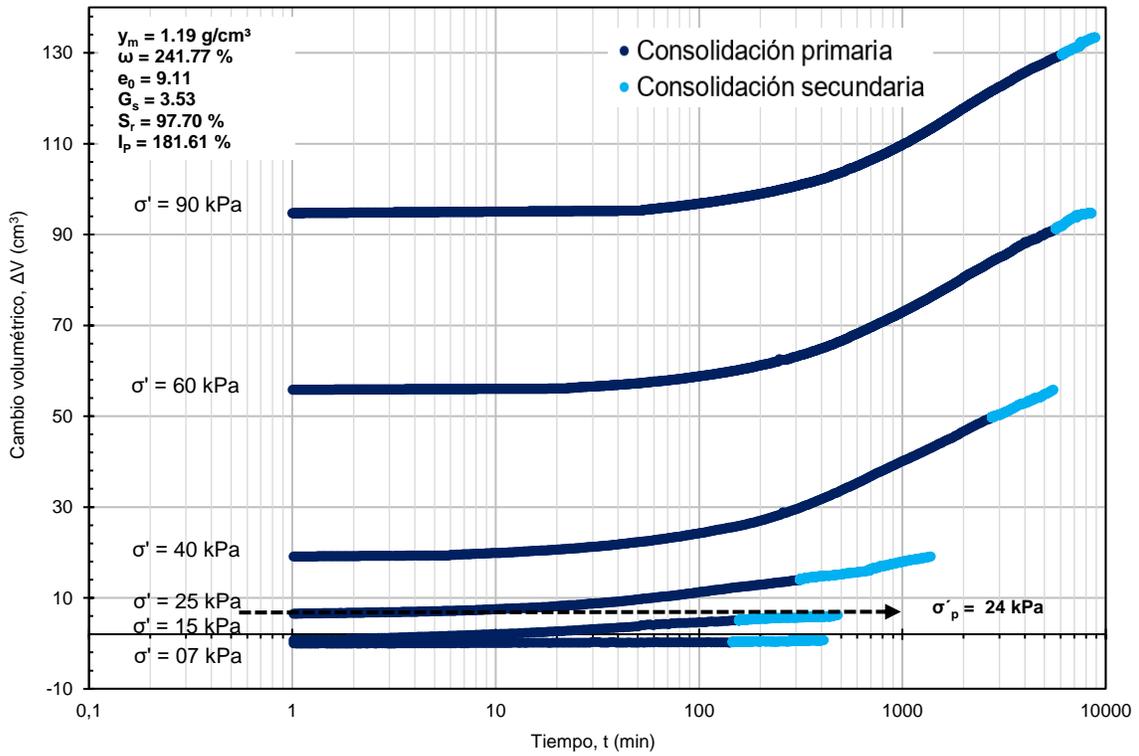


Figura 93. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia

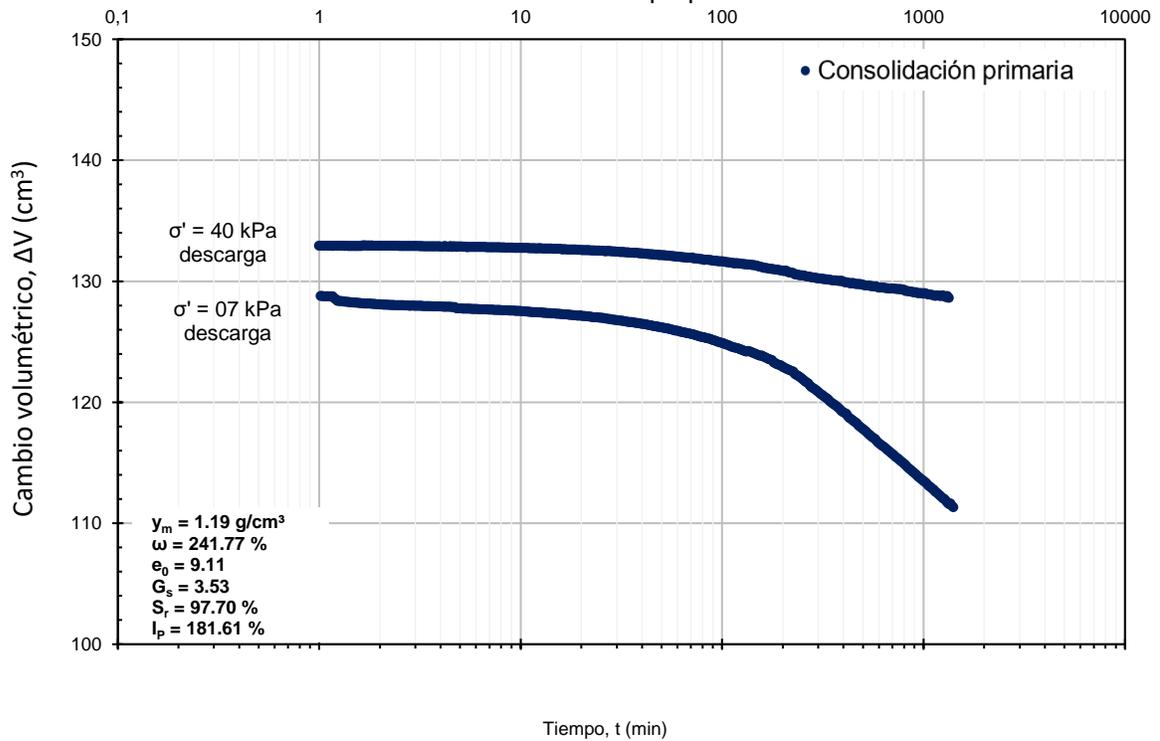


Figura 94. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-19 M 2-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia

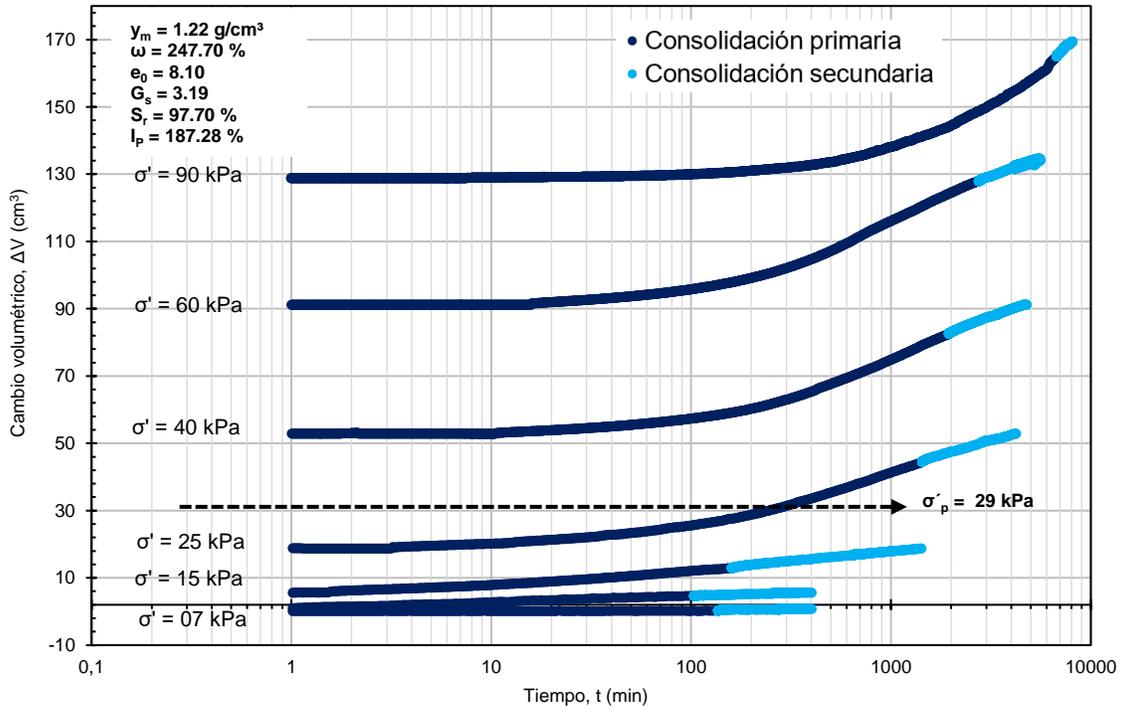


Figura 95. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia

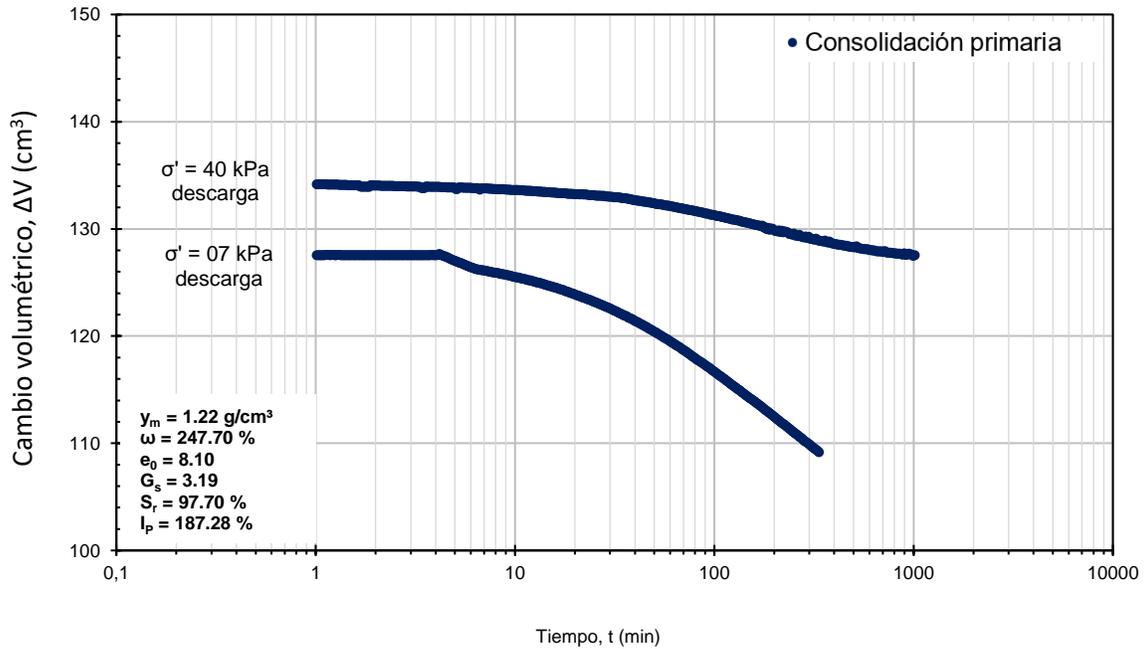


Figura 96. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-16 M 3-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia

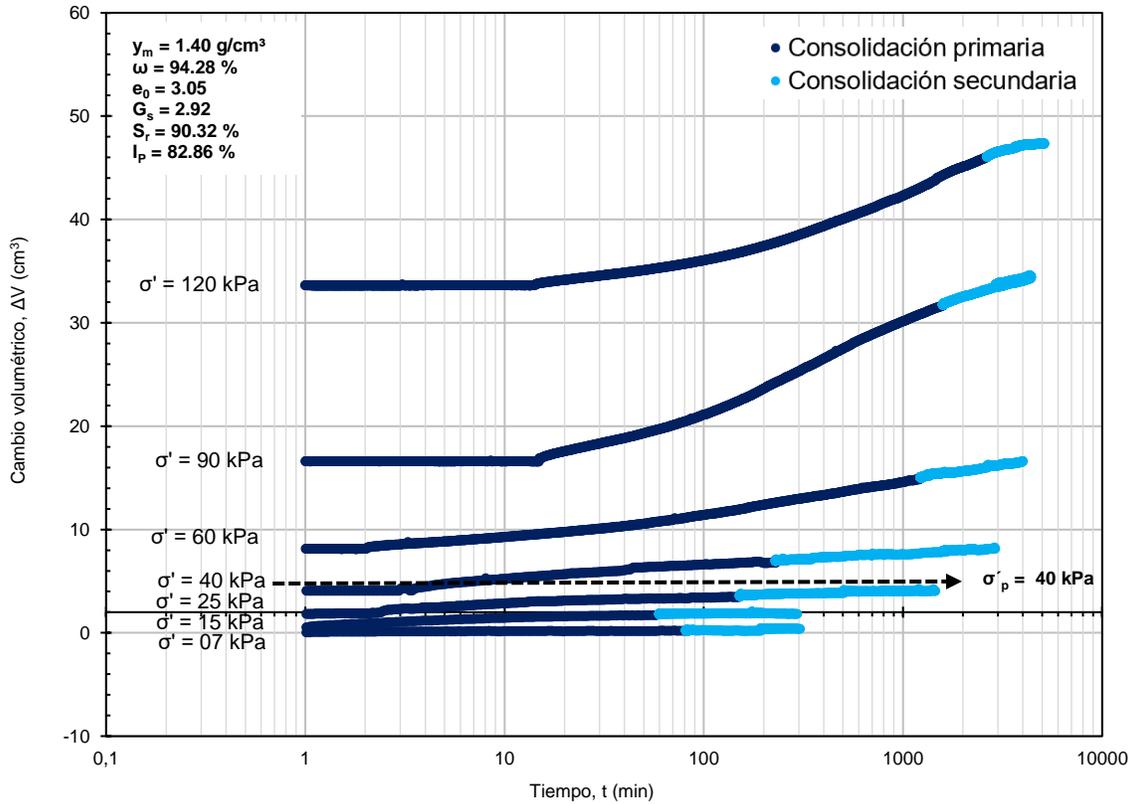


Figura 97. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-18 M 3-1 para el tramo de carga.
Fuente: elaboración propia

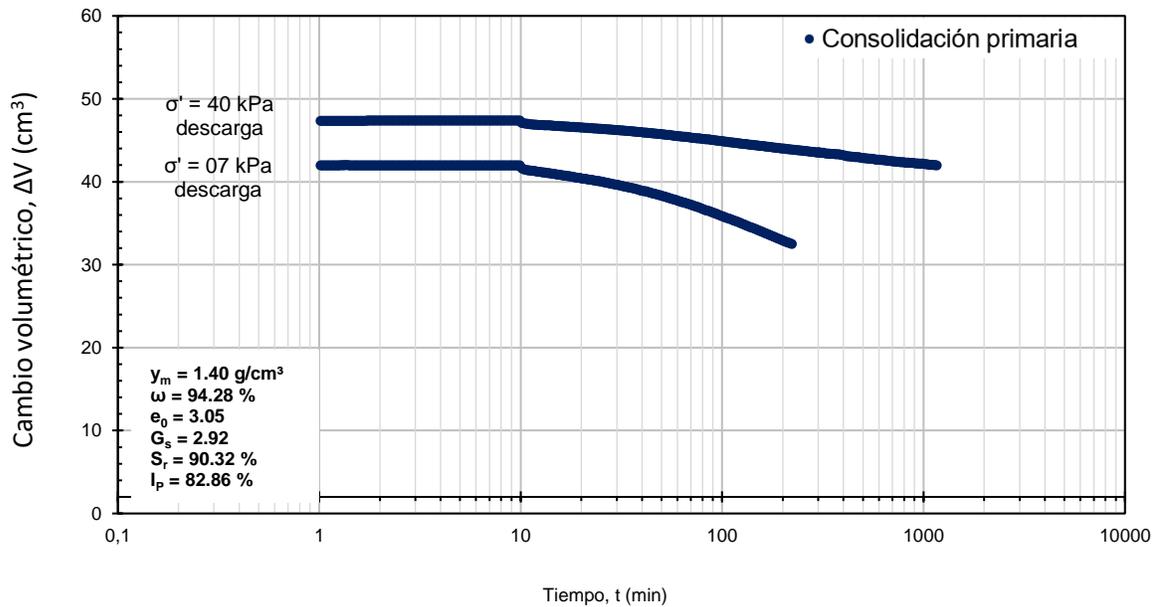


Figura 98. Curva t vs ΔV correspondiente a la muestra SS-18 M 3-1 para el tramo de descarga.
Fuente: elaboración propia

Apéndice 6. Disipación del exceso de presión de poro.

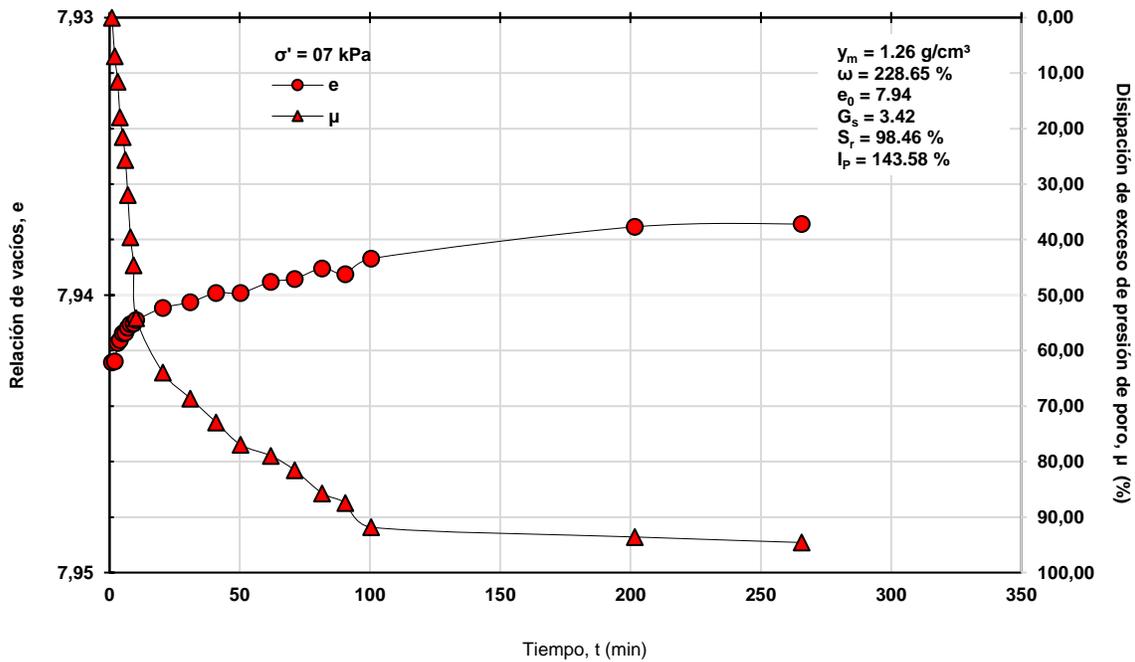


Figura 99. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

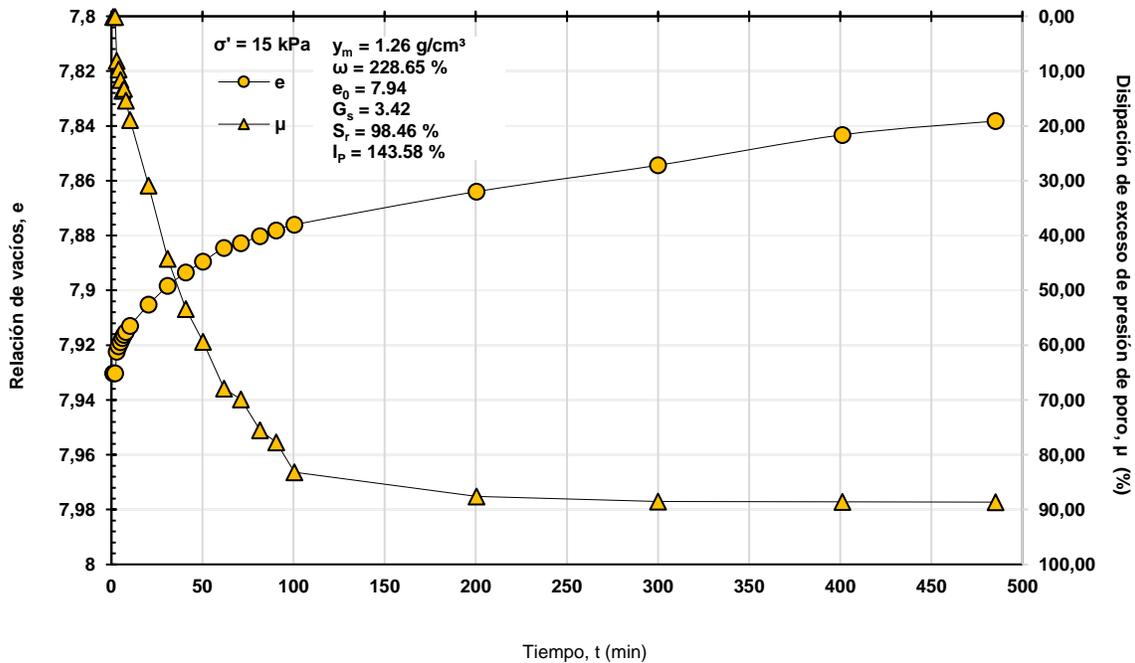


Figura 100. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 15 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

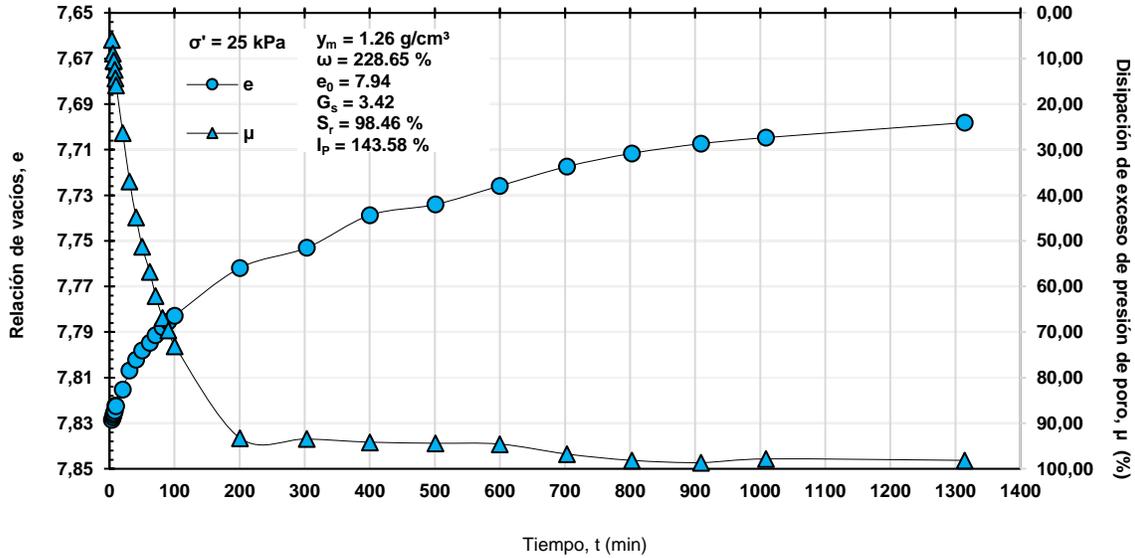


Figura 101. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 25 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

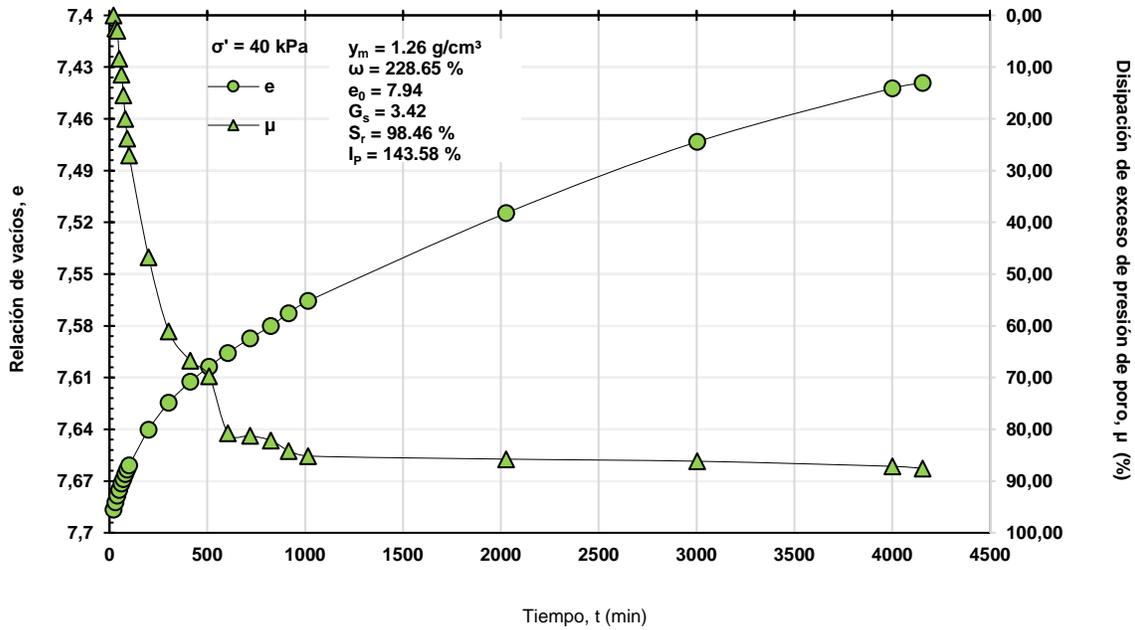


Figura 102. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

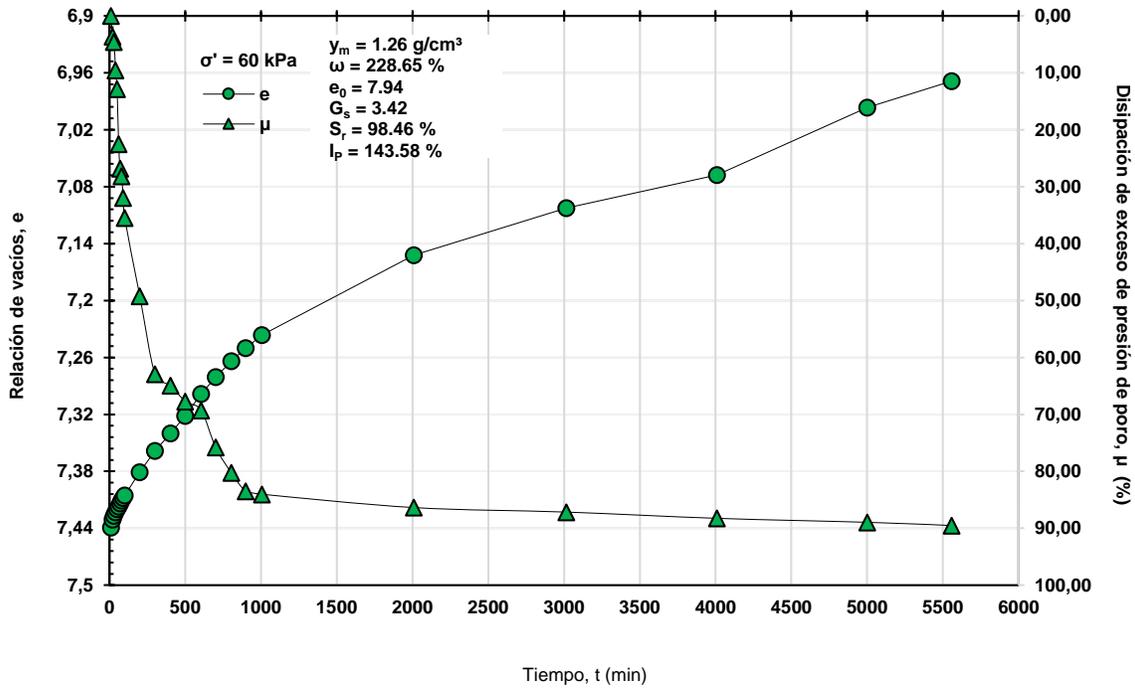


Figura 103. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 60 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

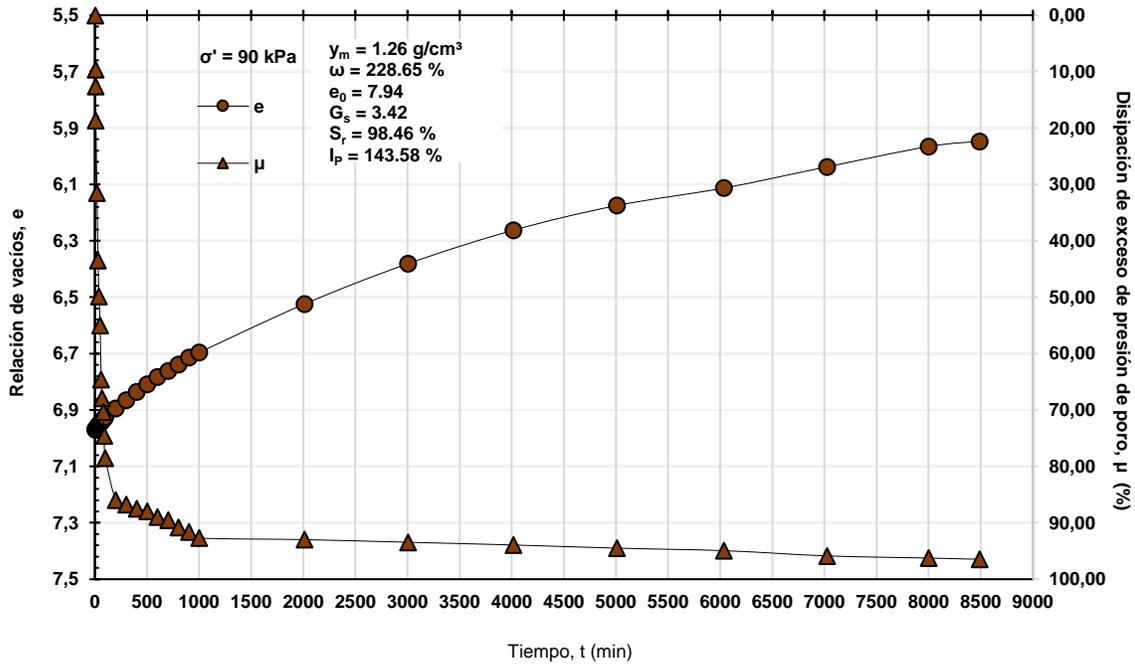


Figura 104. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 90 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

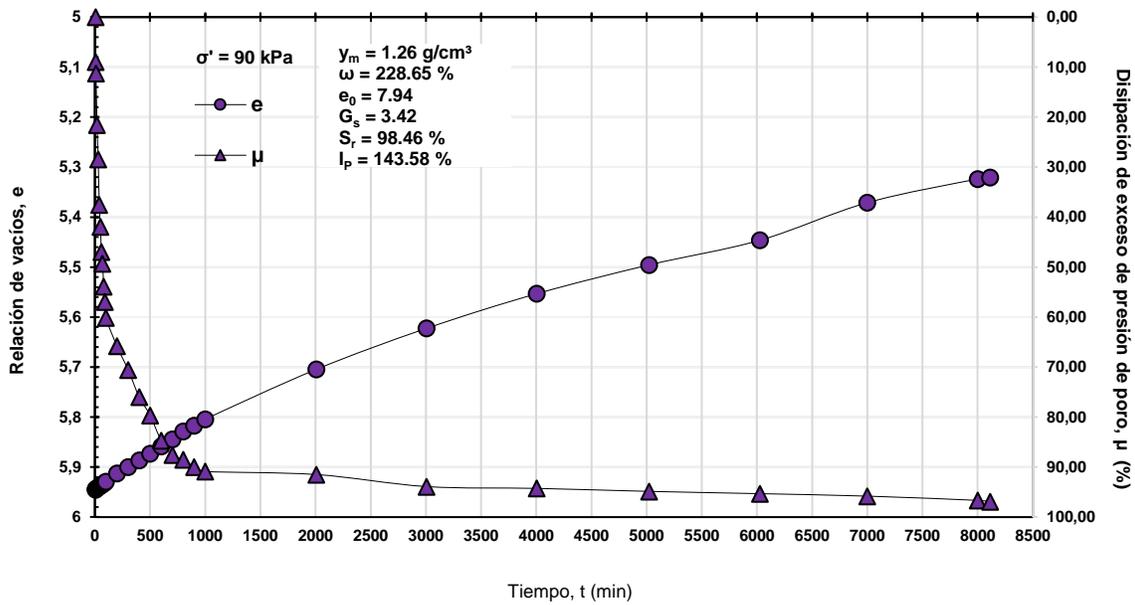


Figura 105. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 90 kPa del tramo de carga de la muestra SS-22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

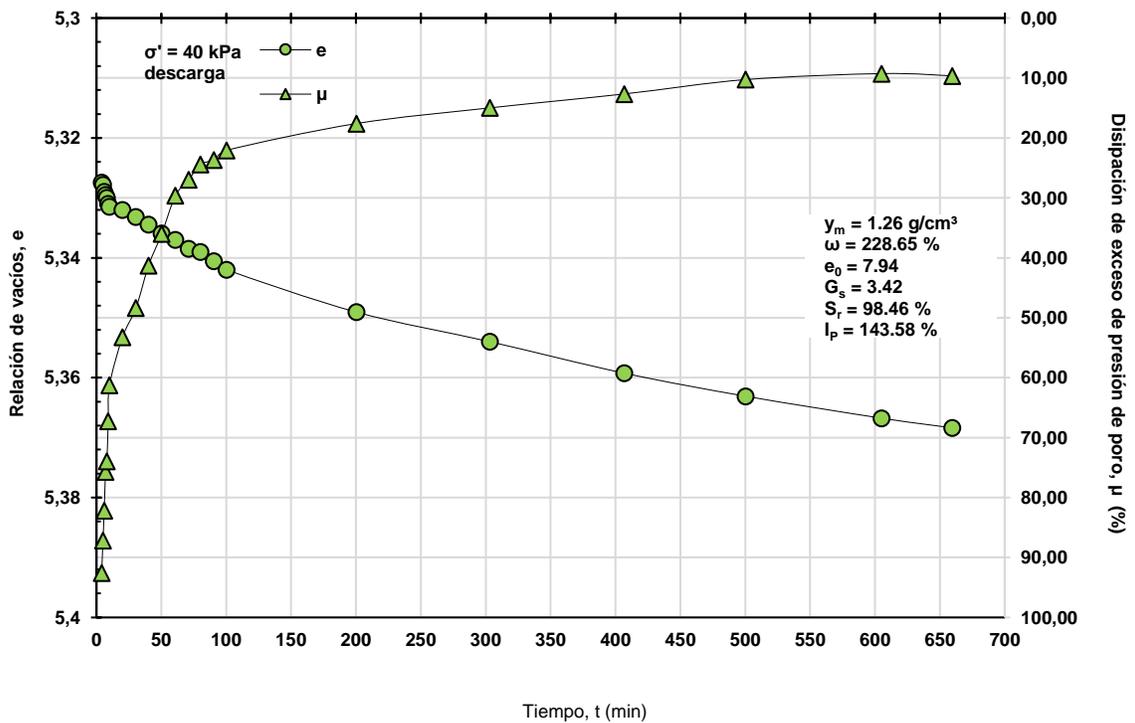


Figura 106. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

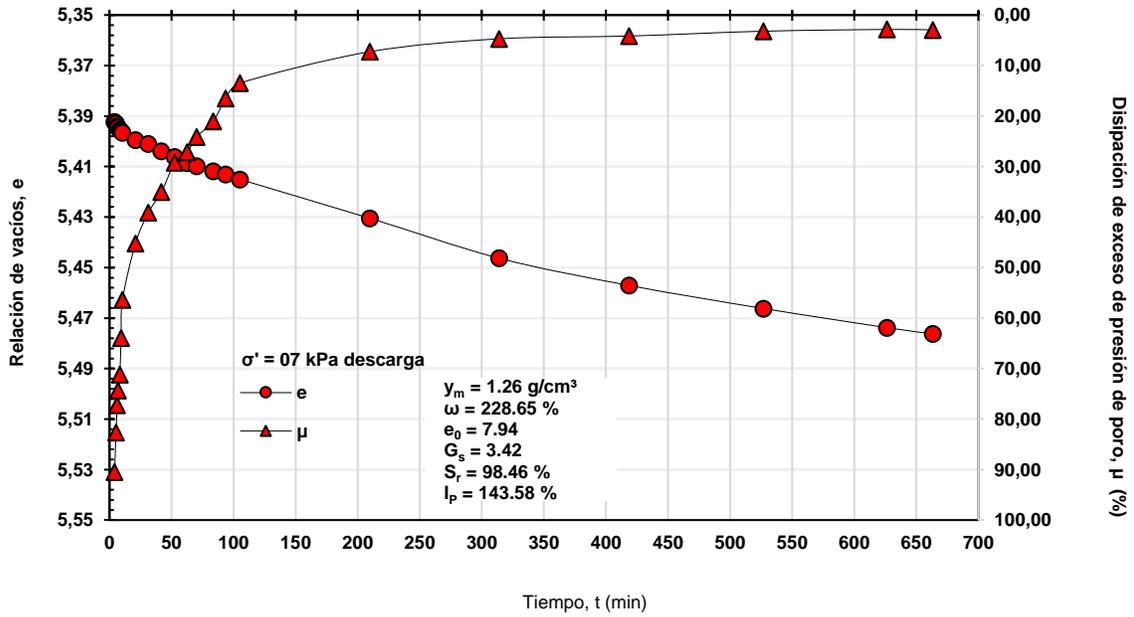


Figura 107. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-22 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

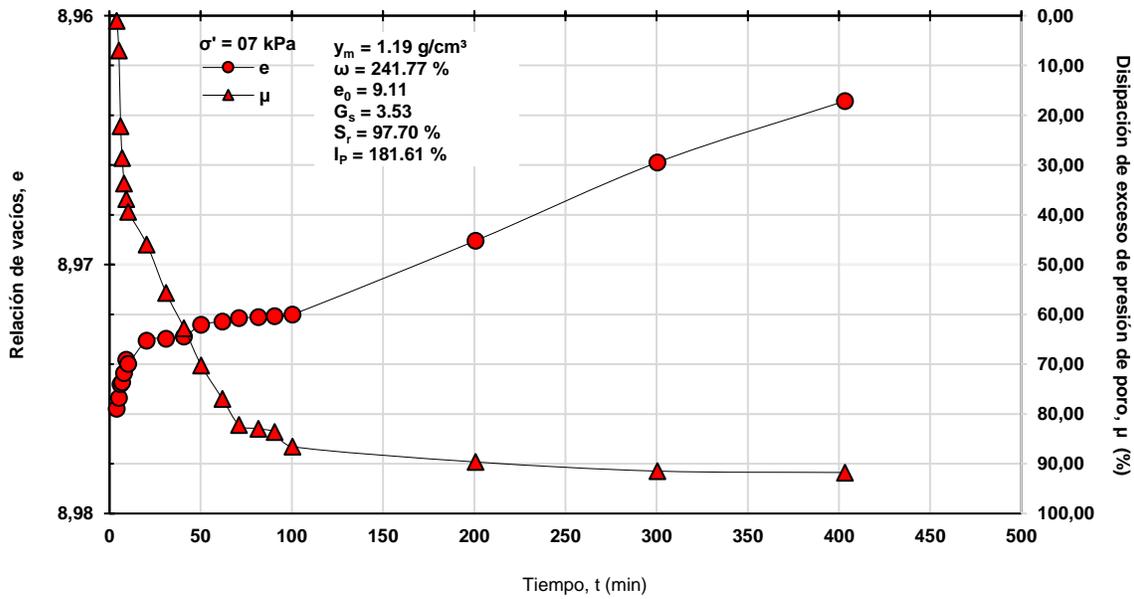


Figura 108. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de carga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

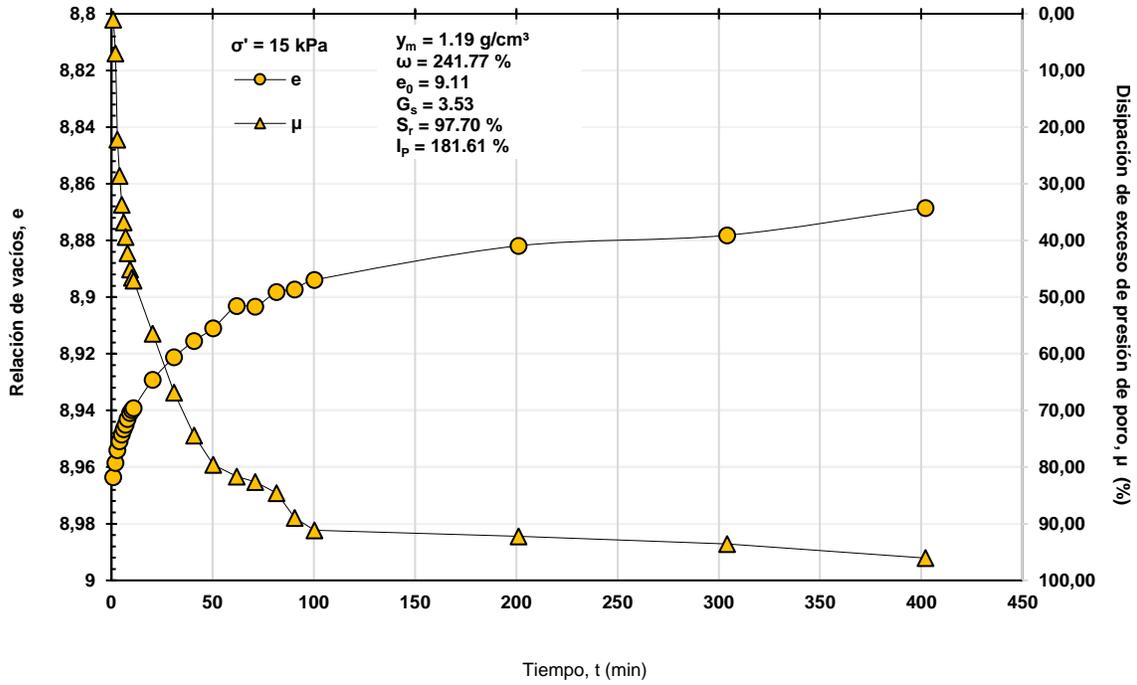


Figura 109. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 15 kPa del tramo de carga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

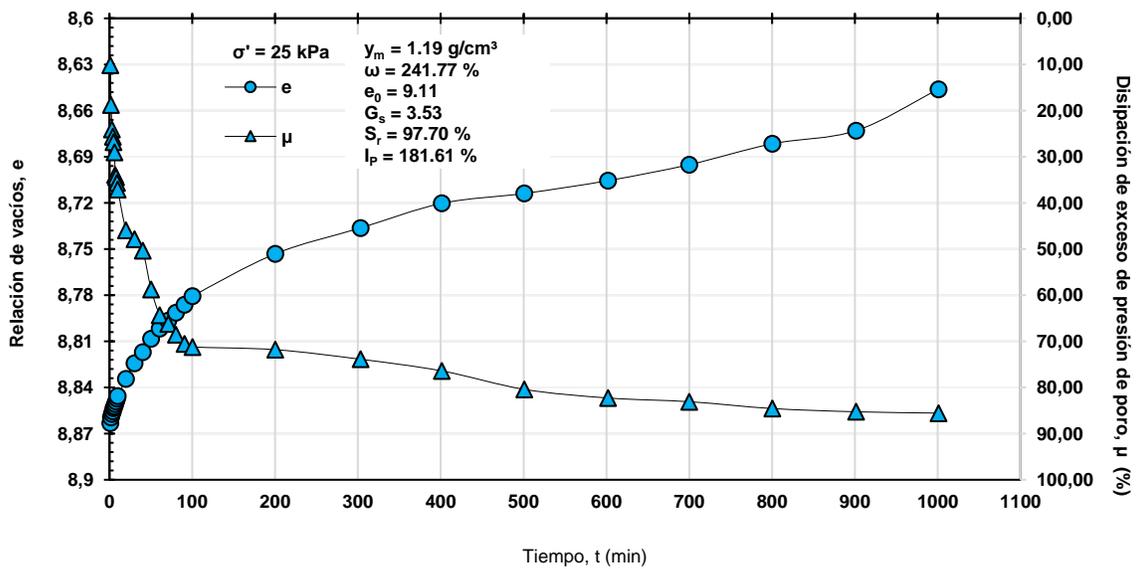


Figura 110. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 25 kPa del tramo de carga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

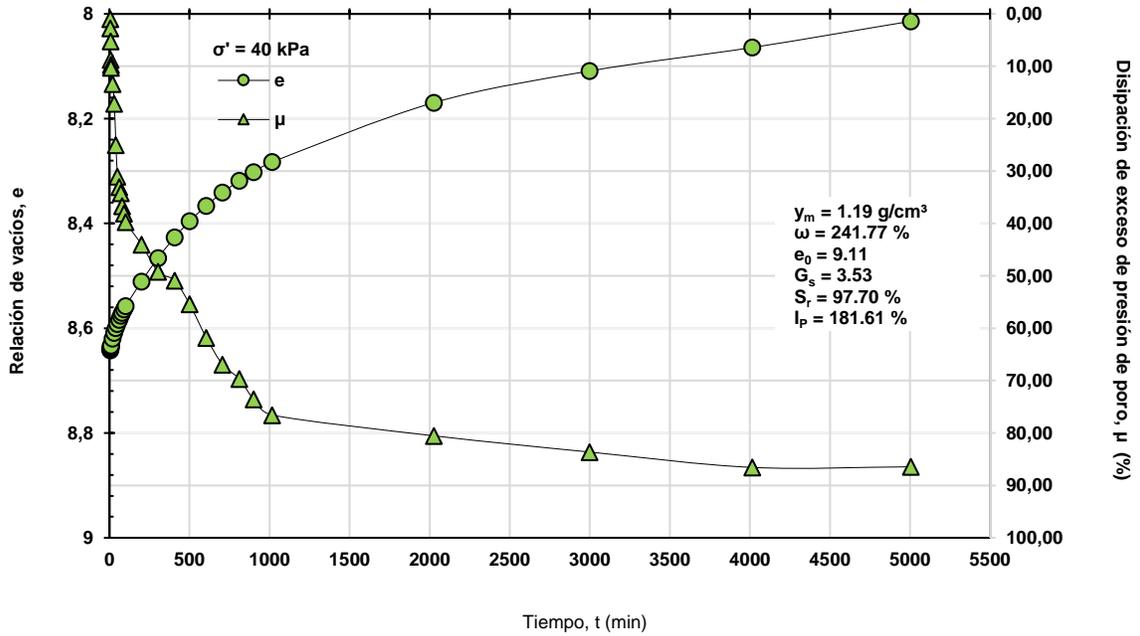


Figura 111. Curva t vs $e - \mu$, correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de carga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

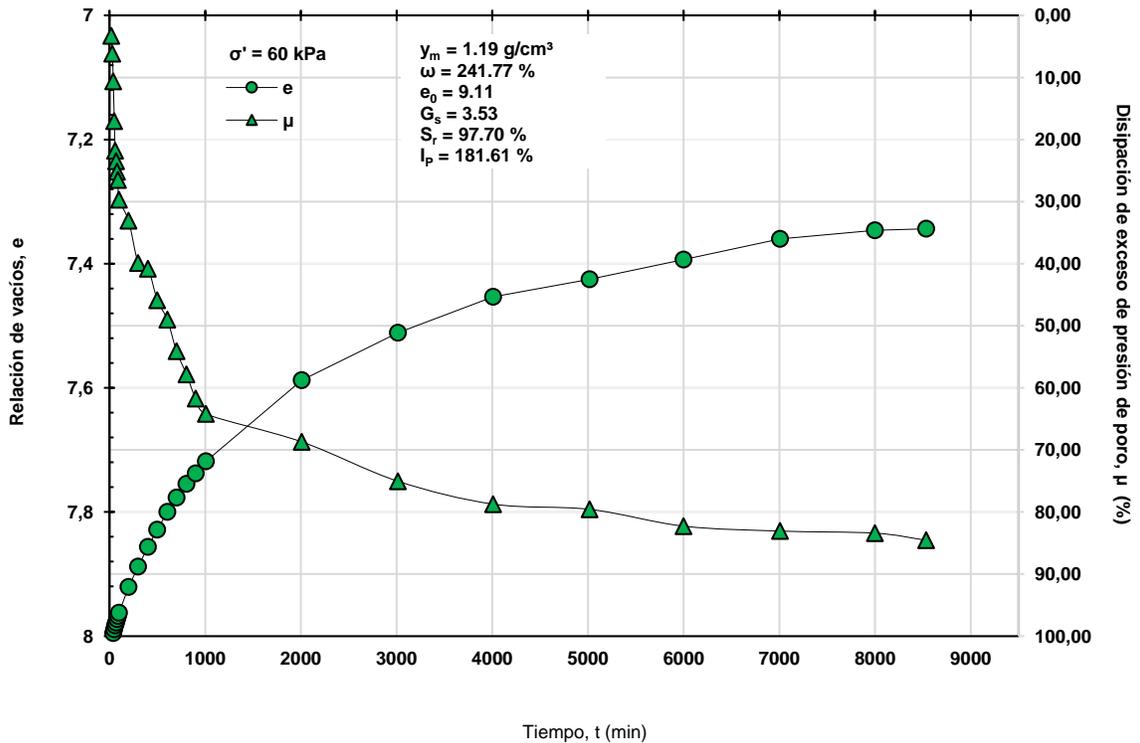


Figura 112. Curva t vs $e - \mu$, correspondiente al σ' de 60 kPa del tramo de carga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

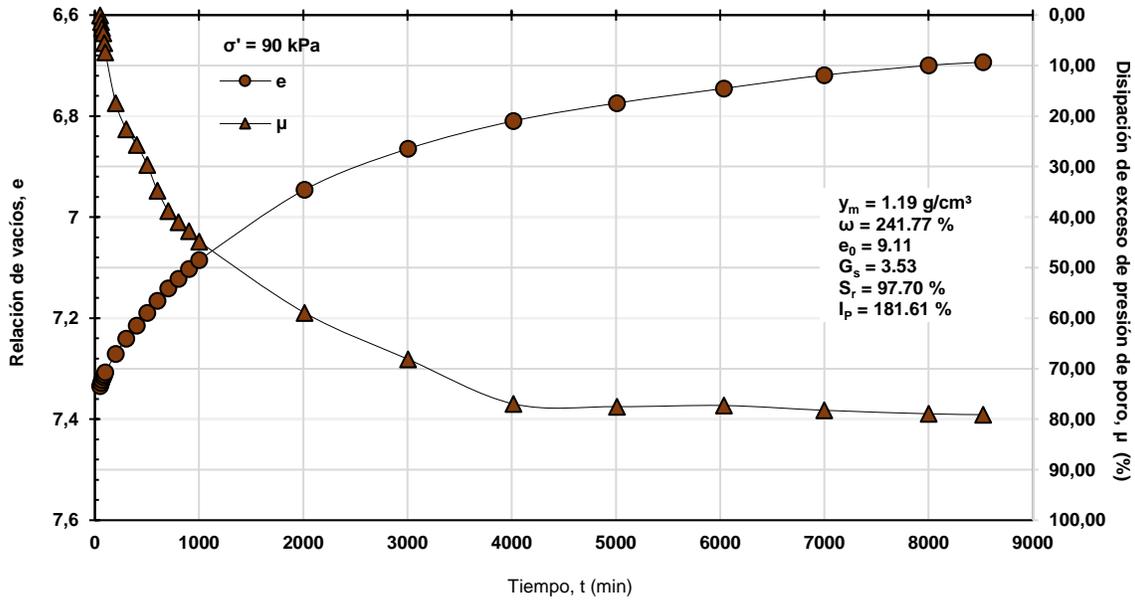


Figura 113. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 90 kPa del tramo de carga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

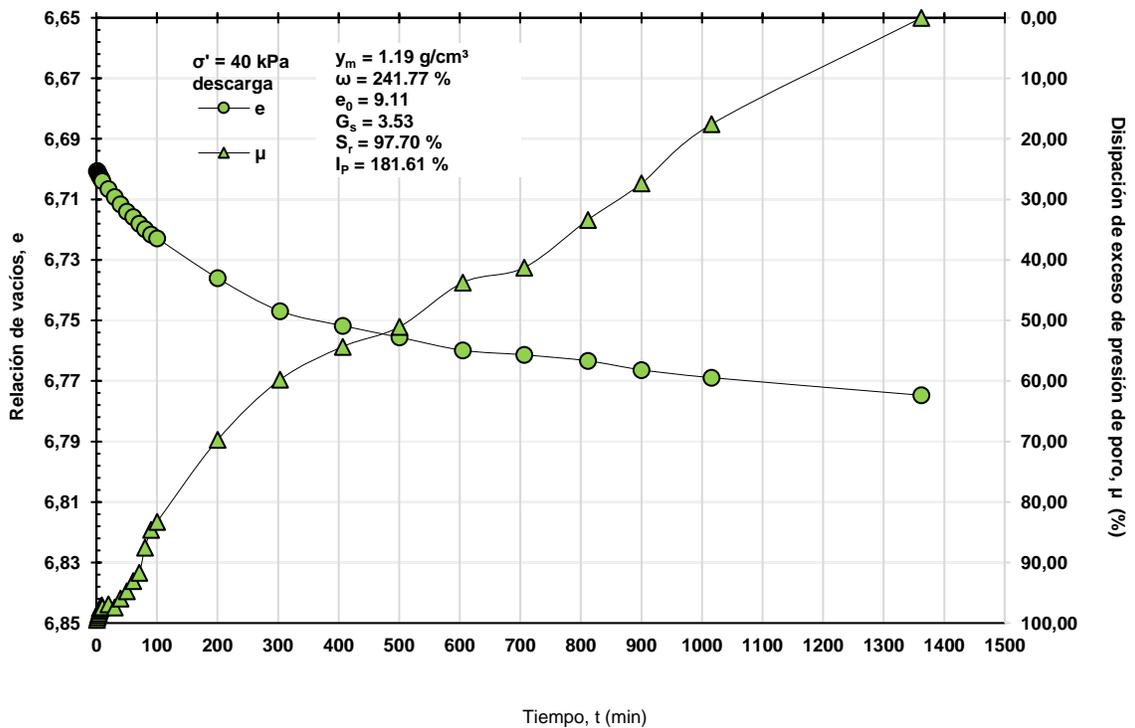


Figura 114. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-19 M 2-1.
Fuente: elaboración propia

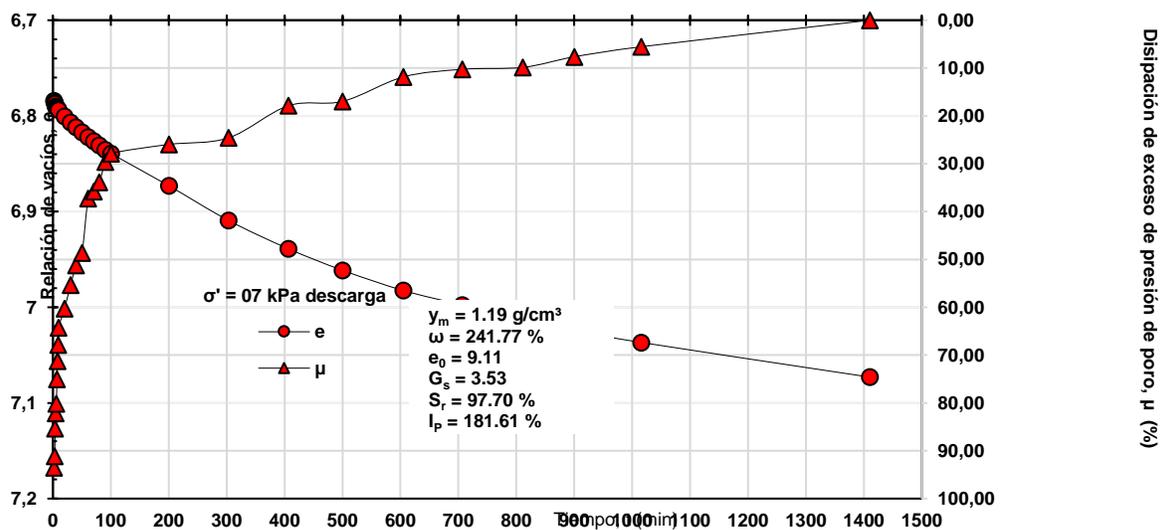


Figura 115. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-19 M 2-1.

Fuente: elaboración propia

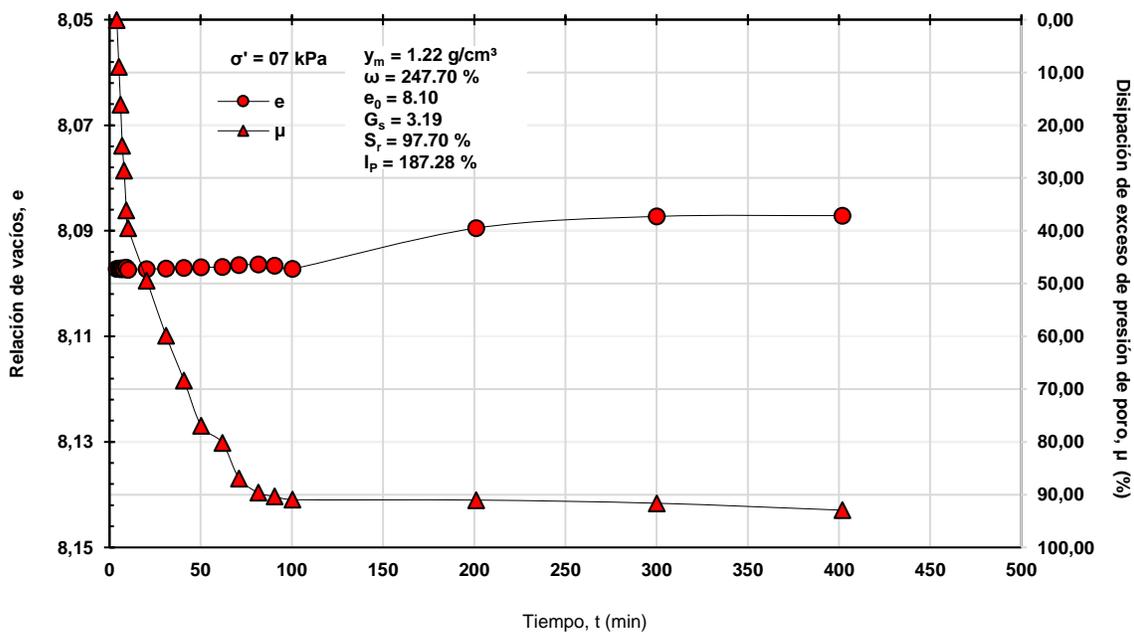


Figura 116. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de carga de la muestra SS-16 M 3-1.

Fuente: elaboración propia

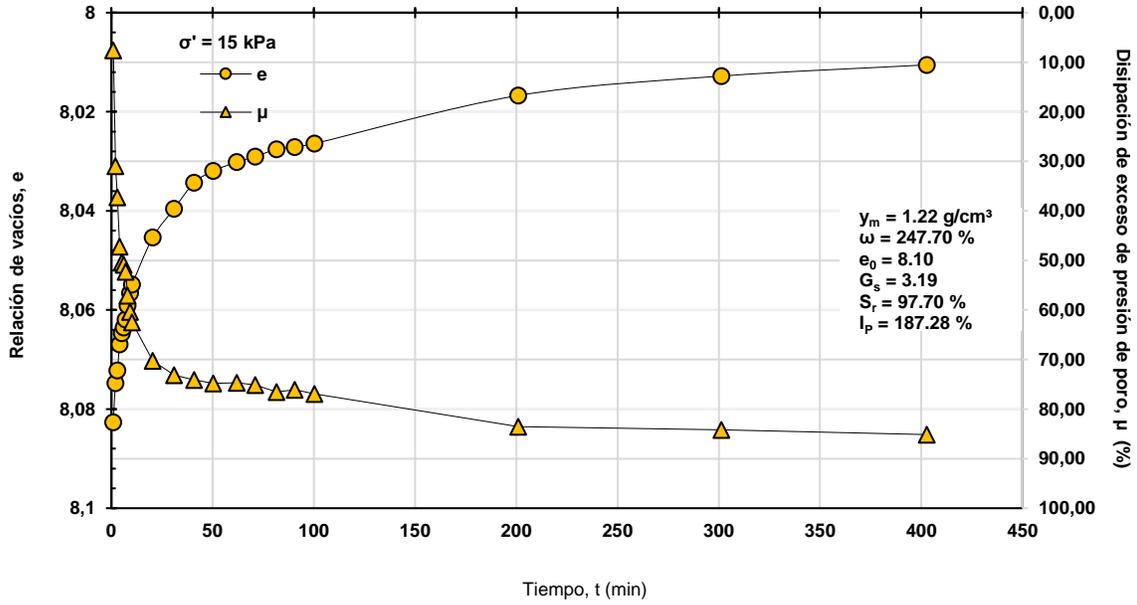


Figura 117. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 15 kPa del tramo de carga de la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

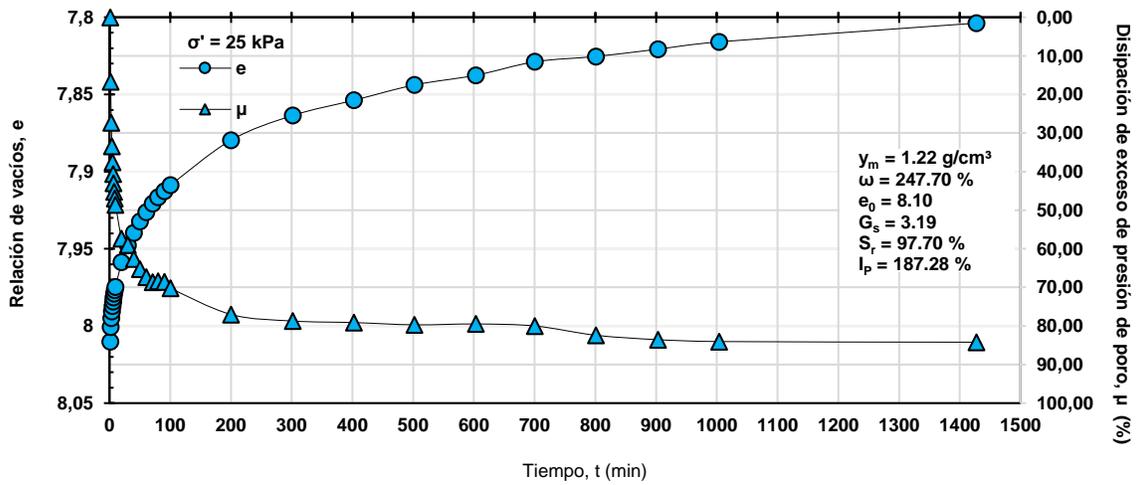


Figura 118. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 25 kPa del tramo de carga de la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

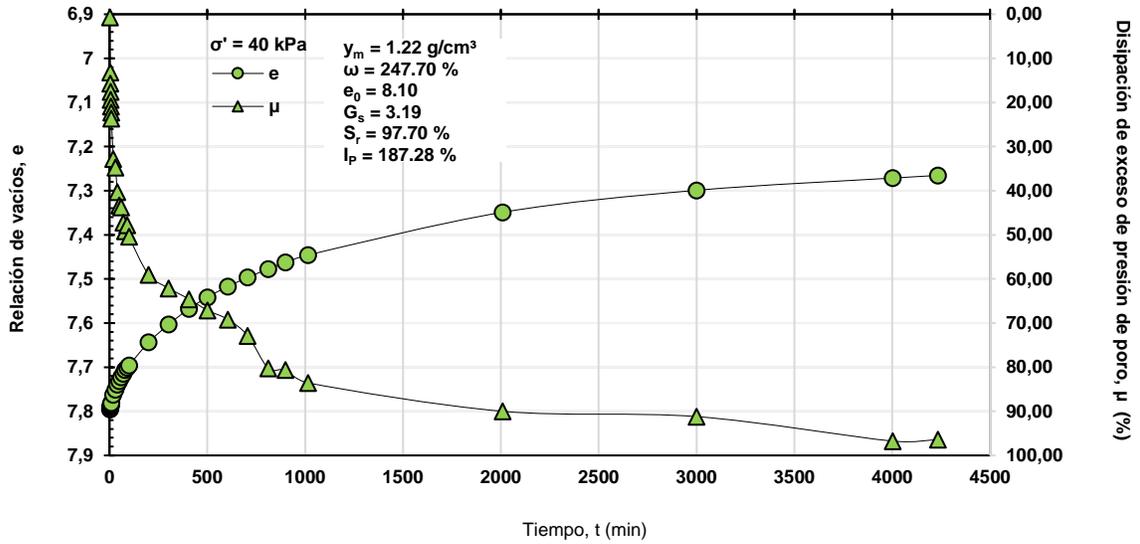


Figura 119. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de carga de la muestra SS-16 M 3-1.

Fuente: elaboración propia

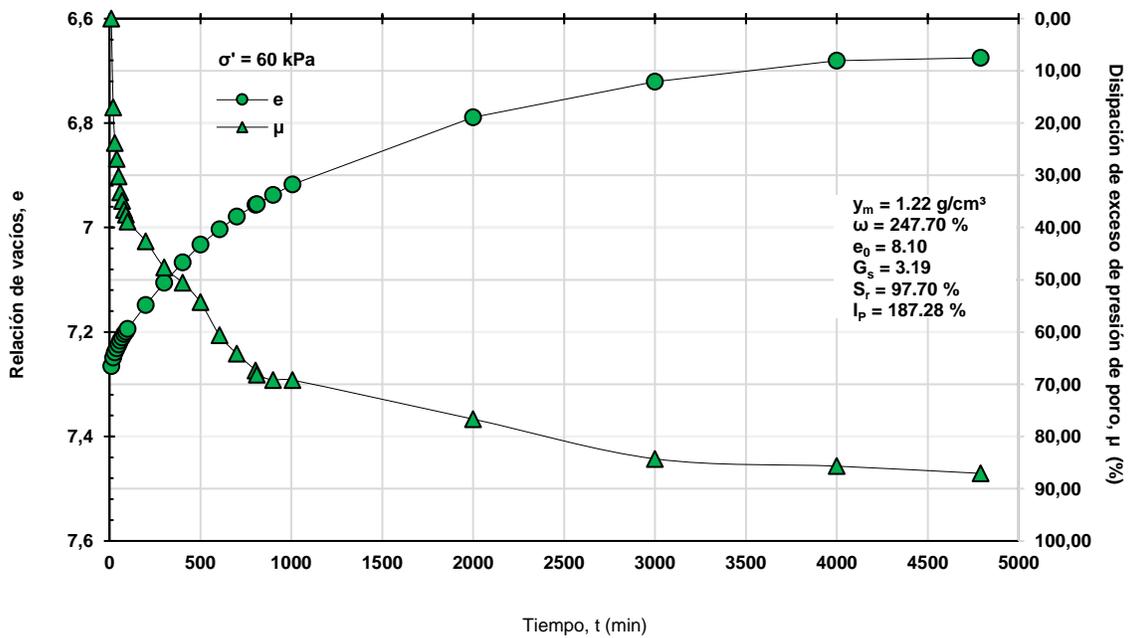


Figura 120. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 60 kPa del tramo de carga de la muestra SS-16 M 3-1.

Fuente: elaboración propia

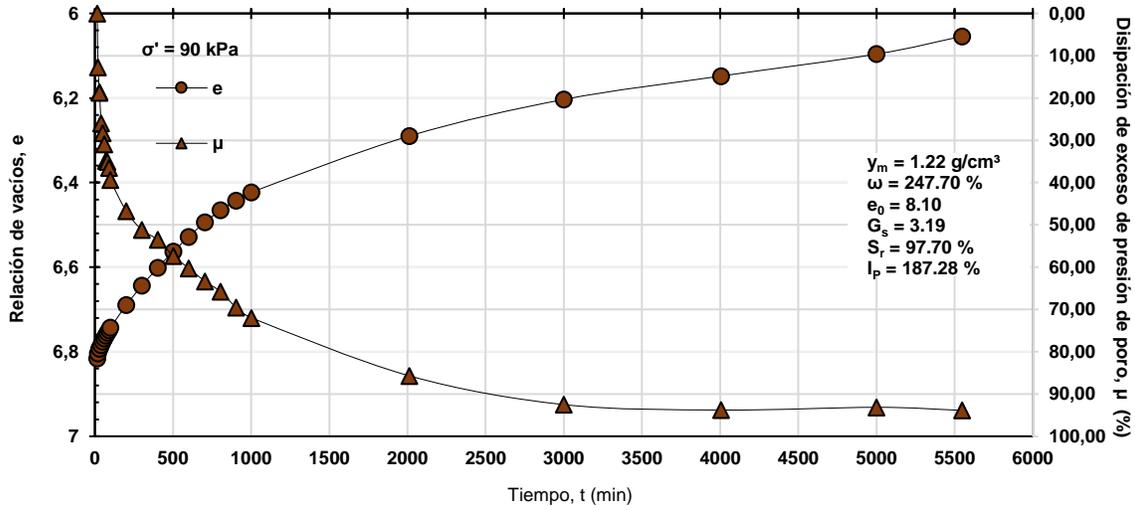


Figura 121. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 90 kPa del tramo de carga de la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

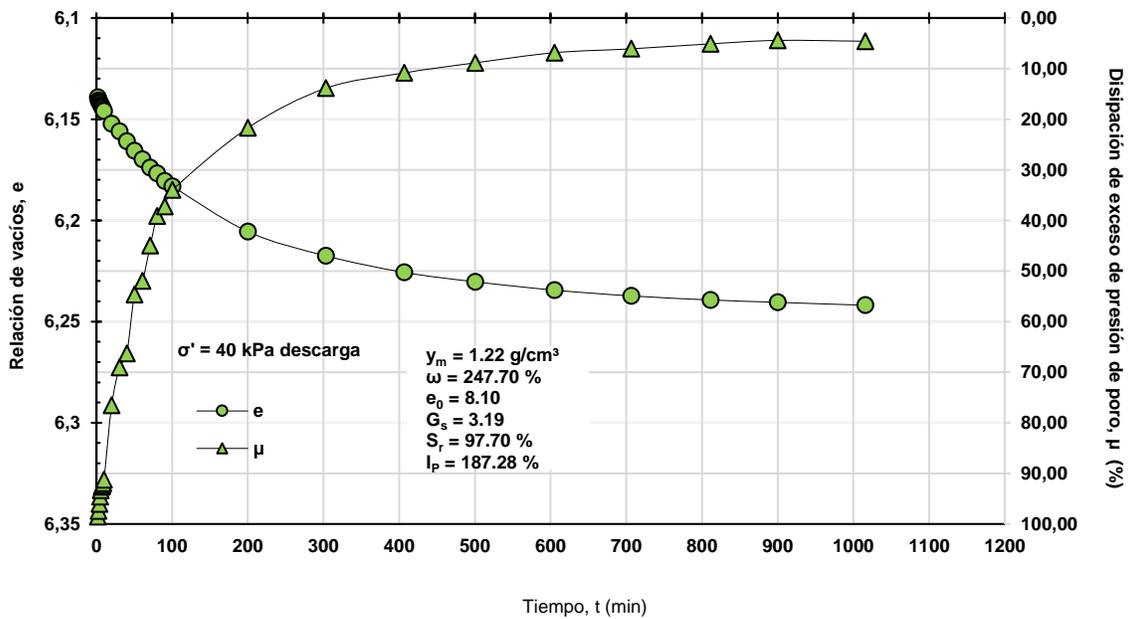


Figura 122. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 40 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia

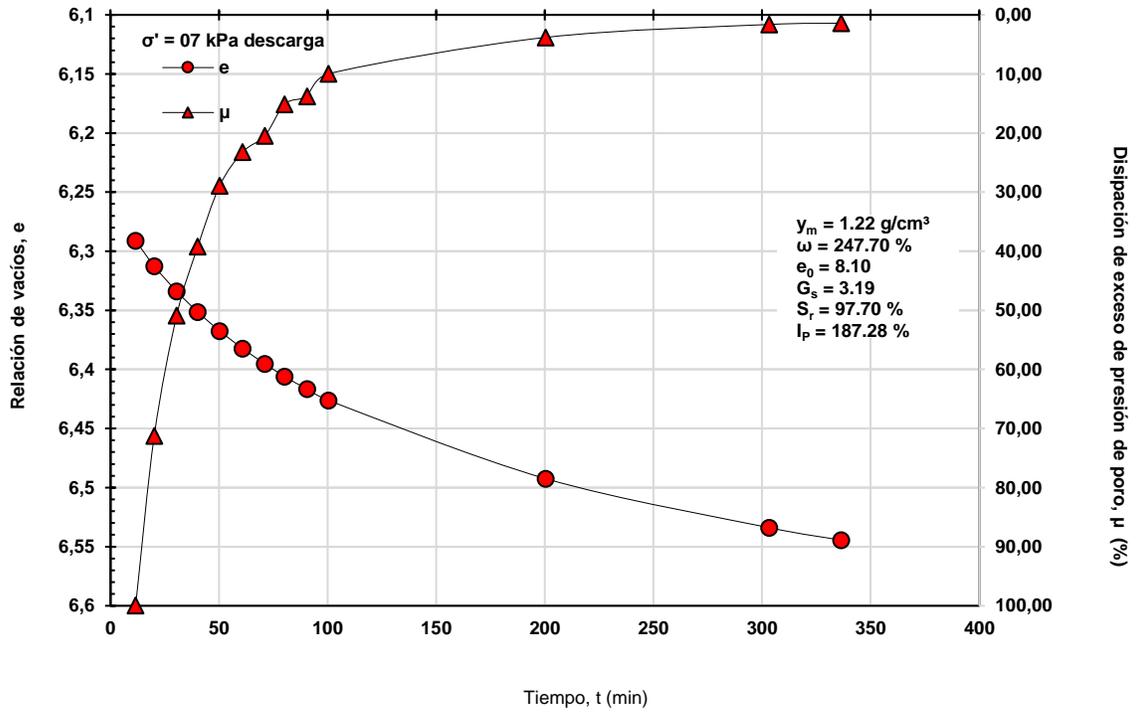


Figura 123. Curva t vs e - μ , correspondiente al σ' de 07 kPa del tramo de descarga de la muestra SS-16 M 3-1.
Fuente: elaboración propia