

Jimena Guadalupe Flores Escareño

Modelación elastoplástica de suelos compactados
durante el colapso por humedecimiento

2025



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
Grado de

Maestra en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Jimena Guadalupe Flores Escareño

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

Querétaro, Qro. a: 14 de noviembre de 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

Modelación elastoplástica de suelos compactados
durante el colapso por humedecimiento

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Jimena Guadalupe Flores Escareño

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

Dr. Eduardo Rojas González
Presidente

Dr. Hiram Arroyo Chavez
Secretario

Dra. Teresa López Lara
Vocal

Dra. Elda Montes Zarazúa
Suplente

M. en I. Gerardo Medellín Aguilar
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (07/25)
México

RESUMEN

Dentro de la clasificación de suelos no saturados encontramos dos principales, naturales y artificiales, que para fin de esta investigación se usará la segunda clasificación, la cual engloba a los suelos compactados; teniendo en cuenta que estos son aquellos suelos que se implementan en todas las construcciones ingenieriles, principalmente cimentaciones y terracerías.

Los principales problemas geotécnicos de los suelos compactados se suelen ocasionar con un aumento o disminución de su grado de saturación, esto se debe a varios factores desde un cambio climático hasta un error de ingeniería dentro de la construcción, lo que puede llegar a causar expansiones o colapsos.

El sitio de investigación se encuentra en Jalpan de Serra, cuyo clima tiende a ser subhúmedo, con lluvias abundantes lo que causa un aumento en la saturación del suelo y también causando su desecación, esto se ve reflejado en los cambios volumétricos del suelo.

Esta investigación se enfoca en la modelación elastoplástica de suelos compactados basado en los esfuerzos efectivos de Bishop, la cual involucra todo el proceso de compactación, desde la preparación del suelo, pasando por superficies de aumento y disminución de succión y terminando con el colapso causado por el aumento de humedecimiento del suelo.

Palabras clave: Suelos compactados, suelos no saturados, esfuerzos efectivos, Succión

ABSTRACT

Within the classification of unsaturated soils, two main groups can be identified: natural and artificial soils. For the purposes of this research, the second classification is adopted, which includes compacted soils. These soils are widely used in engineering constructions, particularly in foundations and earthworks.

The main geotechnical problems associated with compacted soils are generally caused by increases or decreases in their degree of saturation. These variations may result from several factors, ranging from climatic changes to engineering errors during construction, potentially leading to soil expansion or collapse.

The study area is located in Jalpan de Serra, where the climate is predominantly sub-humid, characterized by abundant rainfall. These conditions promote increases in soil saturation as well as drying processes, which are reflected in significant volumetric changes of the soil.

This research focuses on the elastoplastic modeling of compacted soils based on Bishop's effective stress concept. The proposed approach considers the entire compaction process, from soil preparation through suction increase and decrease yield surfaces, and culminates in the collapse behavior induced by soil wetting.

Keywords: Compacted soils, unsaturated soils, effective stress, suction

DEDICATORIA

Me han dicho más de una vez que soy la mujer más valiente de la familia, pero puedo decir que no estoy segura si es verdad; si yo que me fui persiguiendo un sueño o mi madre, que me dejó ir tras él, sabiendo que conmigo se iba una parte de su ser, aquella parte que la acompañaba desde hace tanto tiempo, segura de que lo había hecho tan bien, que sabía que ese desprendimiento sería sólo el principio de tener que cuidarme desde lejos, viendo como cumplía todo lo que alguna vez le dije que iba a lograr. Ella es la que me ha aplaudido tan fuerte durante toda mi vida, que nunca me di cuenta de quien no lo hacía.

Esta tesis se la dedico a ella, que fue más valiente, ocultó su dolor y sólo me mostró una sonrisa en cada despedida y una frase que me acompañaba cuando mi cuerpo y mente estaban tan cansadas que creía que no lo iba a lograr: “llora todo lo que necesites, pero límpiate esas lágrimas y sigue adelante, yo siempre voy a estar contigo”.

AGRADECIMIENTOS

Sinceramente no pensé que lograría llegar hasta este punto, pero si estoy cumpliendo esta meta fue gracias a muchas personas, que me impulsaron a creer en mi potencial y fueron un apoyo cuando ni yo sabía qué hacer con mi existencia.

Agradezco a mi padre Juan Pablo Flores y Ernesto Flores, que, aunque sea a la distancia siempre me sostuvieron a su manera en este proceso; con una palabra de aliento o su preocupación por saber si estaba bien.

A Marcos García, por ser un gran amigo, compañero, porrista y maestro. Desde antes de ingresar a la maestría me extendió una mano amiga sin siquiera conocernos. No alcanzarían las palabras para describir lo mucho que me apoyó durante todo este proceso: me vio llorar, sufrir y reír, me levantó de cada caída, tanto personal como académicamente. Con base en todo lo que vivimos juntos durante estos dos años, puedo decir que es y será el mejor maestro que alguien podría tener la dicha de conocer. Gracias por todo, bro.

A Jordan Reyes, gracias por ser el pegamento de esta amistad y por ayudarme a silenciar las voces intrusivas de mi mente con tu serenidad, calma y empatía. Eres un ser extraordinario que, aunque reservado, representa justo el equilibrio que necesita una persona tan ruidosa e impulsiva como yo cuando la vida agobia. Eres excepcional en lo personal y, sin duda, también en lo académico.

A ambos, gracias por ser los pilares más importantes que me permitieron seguir adelante en este sueño. Su amistad ha sido un curita para mi corazón; les debo mi felicidad en mis momentos más oscuros del tercer semestre. Los quiero mucho y fueron, sin duda, lo mejor que me dejó esta maestría.

Gracias Andrea Rodríguez por estar cuando más la necesitaba, aunque fuera a cientos de kilómetros de distancia, siempre hacía lo necesario para estar para mí, por todas las veces que me escuchaba cuando la vida pesaba o siendo mi fan cuando cumplía alguna meta, eres de las personas más importantes en mi vida, mi hermana de cumpleaños y compañera de aventuras, te amo.

A Osvaldo Paredes, por estar a mi lado en cada momento y caminar conmigo este trayecto que, aun en sus días más difíciles, supiste volver más ligero. Por aprender conmigo de cimentaciones y suelos no saturados, por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí y por llegar a mi vida como hogar y familia cuando la distancia me alejaba de mis raíces. Fuiste y eres refugio, calma y sostén. Eres el jardín con enanitos que siempre soñé tener.

A Eduardo Moreno por brindarme su amistad y su ayuda durante pruebas, ser mi compañía durante largas jornadas de trabajo, ser confidente y hacerme más llevadero el proceso.

A Juan Sebastian Arteaga por ayudarme desde que inicie este proceso, haciéndome participe de su vida y explicándome todo lo que fuese necesario para no fallar en esto llamada maestría; y después de la introducción siguiera en mi vida como amigo.

Al Dr. Eduardo Rojas González por su paciencia y dirección en la realización de esta investigación, fue un honor que compartiera sus conocimientos conmigo.

Al Dr. Hiram Arroyo por su guía y respuesta a mi pedida de auxilio, gracias por su paciencia y ayuda; sin usted no hubiera logrado concluir este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro y al CONAHCYT, por el respaldo otorgado para el desarrollo de mis estudios de posgrado, mediante el programa de becas que impulsa la formación académica y la investigación de alto nivel.

Contenido

	RESUMEN	3
	ABSTRACT.....	4
	Contenido.....	8
	I. INTRODUCCIÓN	15
	1.1 Justificación	15
	1.2 Descripción del Problema	16
	1.3 Hipótesis	18
	1.4 Objetivos	18
1.4.1.	General.....	18
	II. ANTECEDENTES.....	19
	III. ESTADO DEL ARTE.....	20
	3.1 Suelos No Saturados	20
3.1.1	Definición	20
3.1.2	Clasificación de suelos no saturados	22
	3.2 Suelos compactados	24
3.2.1	Definición	24
3.2.2	Tipo de compactación por suelo	25
3.2.3	Métodos de compactación en laboratorio	25
	3.3 Succión	28
3.3.1	Medición de succión	29
3.3.2	Capilaridad.....	29
	3.4 Curvas de retención agua – suelo.....	30
	3.5 Esfuerzos efectivos	32
	3.6 Modelos constitutivos	35
	3.7 Modelo sólido – poroso	36
	3.8 Modelo Elastoplástico para suelos compactados.....	38
	IV. METODOLOGÍA.....	44
	4.1 Recolección de muestras.....	44
	4.2 Caracterización del suelo	45
4.2.3	Peso específico relativo de sólidos (Ss).....	46
4.2.4	Análisis Granulométrico	46
4.2.5	Límites de Consistencia	47
4.2.6	Clasificación del suelo	48

	4.3	<i>Compactación de suelo</i>	48
4.3.1		Compactación dinámica.....	49
4.3.2		Compactación estática	50
	4.4	<i>Obtención de curva de retención agua – suelo</i>	51
4.4.1		Medición de succión con método de papel filtro	52
	4.5	<i>Prueba de consolidación de suelos</i>	55
4.5.1.		Procedimiento de muestras compactadas dinámicamente	55
4.5.2.		Procedimiento de muestras compactadas estáticamente.....	56
	4.6	<i>Colapso por humedecimiento</i>	57
	4.7	<i>Modelación</i>	57
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN		58
	5.1	<i>Caracterización del suelo</i>	58
	5.2	<i>Compactación Proctor</i>	59
5.2.1		Proctor Estándar.....	59
5.2.2		Proctor Modificada	61
	5.3	<i>Compactación estática</i>	62
	5.4	<i>Curva de Retención Agua-Suelo</i>	63
	5.5	<i>Pruebas de preconsolidación</i>	64
	5.6	<i>Modelación</i>	67
VI.	CONCLUSIONES		77
VI.	REFERENCIAS		79
VII.	ANEXOS		81
	7.1.	<i>Peso volumétrico del suelo</i>	81
	7.2.	<i>Peso específico relativo de sólidos (Ss)</i>	81
	7.3.	<i>Análisis granulométrico</i>	84
	7.4.	<i>Límites de consistencia</i>	85
	7.5.	<i>Compresibilidad y preconsolidación de Proctor Estándar</i>	86
	7.6.	<i>Compresibilidad y preconsolidación de compactación estática estándar</i>	89
	7.7.	<i>Compresibilidad y preconsolidación de compactación Proctor Modificada</i>	91
	7.8.	<i>Compresibilidad y preconsolidación de compactación estática modificada</i>	94
	7.9.	<i>Calibración de papel filtro</i>	97
	7.10.	<i>Medición de succión (Método de papel filtro)</i>	98

7.10.1. Succión de Proctor estándar.....	98
7.10.2. Succión de estática estándar.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Suelos dominantes de Jalpan de Serra (INEGI, 2022)	17
Figura 2 Zona de Estudio UAQ Campus Jalpan.....	17
Figura 3 Fases del suelo (Fredlund & Morgenstern, 1977)	21
Figura 4 Zona de suelo saturado y parcialmente saturado (Fredlund, 2000).....	22
Figura 5 a) Proctor Estándar, b) Proctor Modificada.....	26
Figura 6 Estructura alcanzada por el suelo según el punto de compactación	27
Figura 7 Equipo de compactación Harvard (ELE Internacional Ltda., 1993)	27
Figura 8 Acciones ejercidas en el compactador giratorio (Tauta et al., 2007)	28
Figura 9 Curva Retención Agua – Suelo. Tomada de (Meza Ochoa, 2012)	31
Figura 10 Curvas características de succión representativas para arenas, limos y arcillas. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.....	32
Figura 11 Red porosa mostrando enlaces, sitios, macroporos y sólidos (Rojas et al., 2011)	36
Figura 12 Modelo elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos ligeramente compactados en suelo húmedo (Rojas, 2022).....	39
Figura 13 Modelo elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos ligeramente compactados en suelo seco (Rojas, 2022).....	40
Figura 14 Modelo elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos ligeramente compactados igualando suelo seco y húmedo (Rojas, 2022).....	40
Figura 15 Modelo de suelos compactados	43
Figura 16 Determinación del peso específico de la muestra.....	45
Figura 17 Muestra total para granulometría.....	46
Figura 18 Análisis granulométrico.....	47
Figura 19 Análisis granulométrico con hidrómetro	47
Figura 20 Determinación de límite líquido	48
Figura 21 Compactación Proctor	50
Figura 22 Compactación estática para consolidación	51
Figura 23 Pesaje de papel filtro para prueba de succión.....	52
Figura 24 Obtención de anillos para succión	53

Figura 25 Muestras secas para succión	54
Figura 26 Muestras preparadas para línea de humedecimiento	54
Figura 27 Muestras en proceso de humedecimiento para línea de secado	55
Figura 28 Prueba de consolidación a) no saturada, b) saturada	57
Figura 29 Carta de plasticidad	59

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Curva de compactación Proctor Estándar	60
Gráfica 2 Curva de compactación Proctor Modificada.....	61
Gráfica 3 Compilado de las curvas de retención de cada compactación.	64
Gráfica 4 Curvas de compresibilidad de compactación estática estándar	66
Gráfica 5 Compilado de compresibilidades	67
Gráfica 6 Comparación teórica – experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Estándar (No Saturada)	68
Gráfica 7 Comparación teórica - experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Estándar (Saturada)	69
Gráfica 8 Comparación teórico – experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática estándar (Saturada).....	69
Gráfica 9 Comparación teórico – experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática estándar (No Saturada).....	70
Gráfica 10 Comparación teórico - experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Modificada (No Saturada).....	70
Gráfica 11 Comparación teórico - experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Modificada (Saturada)	71
Gráfica 12 Comparación de teórico - experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática modificada (No Saturada.	71
Gráfica 13 Comparación teórica - experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática modificada (Saturada)	72
Gráfica 14 Compilado de simulaciones del modelo elastoplástico	72
Gráfica 15 Colapso del suelo sometido a distintas cargas	73
Gráfica 16 Modelación de colapso con 10 ton/m ²	74
Gráfica 17 Modelación de Colapso con 20 ton/m ²	74

Gráfica 18 Modelación de colapso con 40 ton/m ²	75
Gráfica 19 Modelación de colapso con 60 ton/m ²	75
Gráfica 20 Colapso teórico y experimental	76
Gráfica 21 Deformación volumétrica experimental del suelo por colapso.....	76
Gráfica 22 Curva de calibración de matraz.....	82
Gráfica 23 Peso relativo de sólidos.....	83
Gráfica 24 Granulometría	85
Gráfica 25 Límite Líquido	86
Gráfica 26 Preconsolidación método Casagrande (Proctor No Saturada)	87
Gráfica 27 Preconsolidación método Casagrande (Proctor Saturada).....	88
Gráfica 28 Comparativa de preconsolidación Proctor estándar saturada y no saturada	88
Gráfica 29 Preconsolidación método Casagrande (Estática estándar Saturada).....	89
Gráfica 30 Preconsolidación método Casagrande (Estática estándar no saturada)	90
Gráfica 31 Comparativa de preconsolidación estática estándar saturada y no saturada.....	91
Gráfica 32 Preconsolidación método Casagrande (Proctor modificada saturada).....	92
Gráfica 33 Preconsolidación método Casagrande (Proctor modificada no saturada).....	93
Gráfica 34 Comparativa de preconsolidación Proctor modificada saturada y no saturada	94
Gráfica 35 Preconsolidación método Casagrande (Estática modificada no saturada).....	95
Gráfica 36 Preconsolidación método Casagrande (Estática modificada saturada).....	96
Gráfica 37 Curva de calibración de caja 1 de papel filtro Whatman No. 42	97
Gráfica 38 Curva de calibración de caja 2 de papel filtro Whatman No. 42	98
Gráfica 39 Curvas de retención - agua suelo (Proctor estándar)	100
Gráfica 40 Curvas de retención - agua suelo (estática estándar)	102
Gráfica 41 Curvas de secado y humedecimiento Proctor estándar y estática estándar	102
Gráfica 42 Curvas de retención - agua suelo (Proctor modificado).....	105
Gráfica 43 Curvas de retención - agua suelo (Estática modificado).....	107
Gráfica 44 Curvas de secado y humedecimiento Proctor modificada y estática modificada	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición (Meza Ochoa, 2012).....	29
Tabla 2 Ecuaciones de esfuerzos efectivos presentadas por diversos autores (Fredlund &	

Rahardjo, 1993).....	34
Tabla 3 Propiedades índice del suelo.....	58
Tabla 4 Tabla resumen de curvas de compresibilidad.....	66
Tabla 5 Porcentaje de similitud teórica - experimental	73
Tabla 6 Peso volumétrico del suelo	81
Tabla 7 Calibración de matraz para prueba peso específico relativo Ss.....	82
Tabla 8 Peso relativo de sólidos.....	83
Tabla 9 Granulometría con mallas.....	84
Tabla 10 Prueba de hidrómetro para análisis granulométrico	84
Tabla 11 Límites de consistencia.....	85
Tabla 12 Compresibilidad de Proctor estándar no saturada.....	86
Tabla 13 Curva de compresibilidad Proctor estándar saturada.....	87
Tabla 14 Curva de compresibilidad estática estándar saturada	89
Tabla 15 Curva de compresibilidad estática estándar no saturada	90
Tabla 16 Curva de compresibilidad Proctor modificada saturada	91
Tabla 17 Curva de compresibilidad Proctor modificada no saturada	92
Tabla 18 Curva de compresibilidad estática modificada no saturada.....	94
Tabla 19 Curva de compresibilidad estática modificada saturada.....	95
Tabla 20 Calibración de caja 1 de papel filtro Whatman No. 42.....	97
Tabla 21 Calibración de caja 2 de papel filtro Whatman No. 42.....	97
Tabla 22 Preparación de muestras para Proctor estándar	98
Tabla 23 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Proctor estándar).....	99
Tabla 24 Trayectoria de humedecimiento (Proctor estándar).....	99
Tabla 25 Trayectoria de secado (Proctor estándar).....	99
Tabla 26 Preparación de muestras para estática estándar	100
Tabla 27 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Estática estándar).....	101
Tabla 28 Trayectoria de humedecimiento (Estática estándar).....	101
Tabla 29 Trayectoria de secado (Estática estándar).....	101
Tabla 30 Preparación de muestras para Proctor modificada.....	103
Tabla 31 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Proctor modificada)	103
Tabla 32 Trayectoria de humedecimiento (Proctor modificada)	104

Tabla 33 Trayectoria de secado (Proctor modificada)	104
Tabla 34 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Estática modificada)	105
Tabla 35 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Estándar modificada)	106
Tabla 36 Trayectoria de humedecimiento (Estática modificada)	106
Tabla 37 Trayectoria de secado (Estática modificada)	106

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Un suelo no saturado o parcialmente saturado está ligado a las variables ambientales como el clima, régimen de lluvia, tasas de evaporación y transpiración para que se llegue a dar esta categoría, a diferencia de lo que sería un suelo seco o saturado; ya que sus espacios vacíos o poros están ocupados tanto por agua como por aire (Meza Ochoa, 2012).

Los problemas relacionados con la deformación de los suelos están íntimamente ligados con los cambios volumétricos que se pueden llegar a presentar en suelos expansivos, colapsables, agrietamientos por desecación y suelos compactados (Meza Ochoa, 2012).

En países como Estados Unidos y Canadá, los problemas ocasionados por los suelos no saturados involucran pérdidas millonarias por las afectaciones que se tienen en estructuras, porque se tiene conciencia que la situación más crítica de un suelo es cuando está en condición saturada, por lo tanto se diseña para ese escenario, pero no se tiene en cuenta lo que pasa en el suelo durante el proceso de saturación, los cambios que este puede sufrir y las afectaciones que va a causar a la estructura si se llegarán a presentar expansiones o colapsos en el suelo (de Agreda & Lloret Morancho, 1985).

La compactación es el procedimiento en el cual se aplica una energía mecánica y se aumenta su humedad al suelo para reducir su volumen de vacíos, ocupando los poros con agua y expulsando el aire, dando paso a un aumento de su densidad, con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo.

Dado que los suelos compactados exhiben comportamientos no lineales bajo cargas aplicadas, caracterizados por deformaciones permanentes y una interacción compleja entre esfuerzos y deformaciones, el uso de un modelo elastoplástico permite capturar con mayor precisión la respuesta del material. Esto incluye tanto la elasticidad inicial (reversible) como la plasticidad (irreversible), así como el efecto de la historia de esfuerzos en el comportamiento mecánico del suelo.

La implementación de un modelo matemático para los suelos compactados, utilizando el parámetro χ de Bishop, nos permite predecir las presiones del agua en el suelo, dependiendo del grado de saturación e índice de poros, lo que nos proporciona una visión de los cambios volumétricos consiguientes.

Utilizar un modelo que muestre los cambios volumétricos de suelo compactado con distintos métodos y energía de compactación, implementando parámetros experimentales fáciles de obtener, con esto garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras construidas sobre estas a largo plazo.

1.2 Descripción del Problema

Los principales problemas geotécnicos de suelos no saturados, están relacionados con los cambios ambientales, ya que con un aumento en la humedad del suelo se presenta un cambio en su comportamiento, en el que se puede presentar una disminución en la succión; esto conlleva a una disminución en la rigidez del suelo, también se presentan asentamientos diferenciales, expansión o colapso del suelo.

El material utilizado en esta investigación fue recolectado en el municipio de Jalpan de Serra, ubicado al norte del estado de Querétaro. Este municipio limita al norte con el estado de San Luis Potosí, al este con Landa de Matamoros, al sur con San Joaquín y Pinal de Amoles, y al oeste con Arroyo Seco, además de colindar nuevamente con el estado de San Luis Potosí.

La región presenta un clima semicálido subhúmedo, el cual predomina durante aproximadamente el 57.67 % del año. Estas condiciones climáticas, caracterizadas por precipitaciones abundantes, favorecen tanto el incremento en el grado de saturación del suelo como procesos de desecación posterior, lo que influye directamente en los cambios volumétricos del material estudiado. (INEGI, 2022).

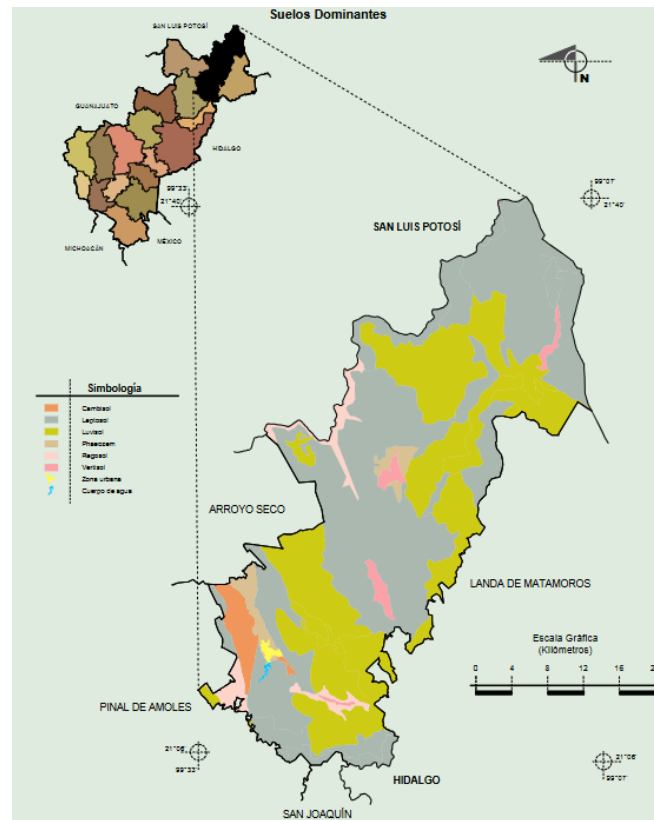


Figura 1 Suelos dominantes de Jalpan de Serra (INEGI, 2022)

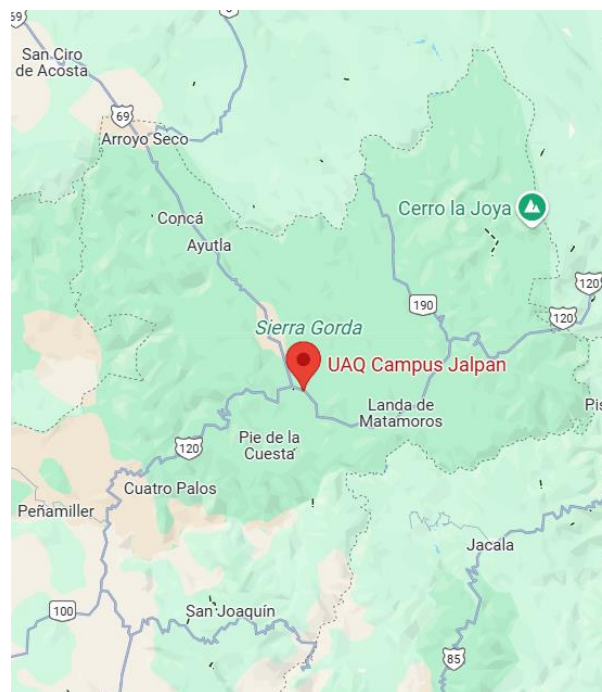


Figura 2 Zona de Estudio UAQ Campus Jalpan

La zona de estudio se observa en la **Figura 2**, cuyos suelos predominantes se observan en **Figura 1**, que incluyen (SEMARNAT, 2008):

- Phaeozem: Estos suelos se localizan en regiones de clima templado y húmedo, donde predominan pastizales altos o bosques como vegetación natural. Su tonalidad oscura y su riqueza en materia orgánica les otorgan un elevado potencial agrícola. No obstante, su aprovechamiento se ve limitado por la erosión causada por el viento y el agua, así como por períodos de sequía. En México, estos suelos se encuentran principalmente en el Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Occidental, la Península de Yucatán, así como en los estados de Guanajuato y Querétaro.
- Leptosol: Se distinguen por su reducida profundidad, que no supera los 25 cm. Dentro de este grupo, una parte significativa corresponde a los leptosoles líticos, cuya profundidad es de 10 cm o menos. También destacan los leptosoles réndzicos, formados sobre rocas calizas y con un alto contenido de materia orgánica. En ciertas condiciones, estos suelos pueden ser altamente productivos para la agricultura; sin embargo, en otros casos, su poca profundidad los hace extremadamente secos, y la presencia de calcio puede provocar la inmovilización de los nutrientes minerales, reduciendo su utilidad.

El comportamiento de los suelos compactados está determinado por variables de estado, como la densidad seca, el índice de poros, el grado de saturación y la microestructura, las cuales dependen del proceso de compactación, así como de factores como la humedad, la energía y el método empleado en la compactación.

1.3 Hipótesis

Empleando un modelo elastoplástico basado en el principio de esfuerzos efectivos de Bishop es posible predecir los cambios volumétricos de suelos compactados estática y dinámicamente.

1.4 Objetivos

1.4.1. General

Desarrollar un modelo elastoplástico capaz de simular el comportamiento volumétrico de suelos compactados.

1.4.2. Específicos

- Determinar la energía de compactación y la humedad óptima del suelo mediante el ensayo Proctor.

- Formular un modelo elastoplástico que describa el comportamiento volumétrico de una arena arcillosa compactada.
- Obtener la curva de retención agua-suelo (CRAS) de una arena arcillosa a diferentes niveles de energía de compactación utilizando el método del papel filtro
- Comparación de resultados teórico – experimentales.

II. ANTECEDENTES

El estudio de la mecánica de suelos no saturados como respuesta a la necesidad de entendimiento de los problemas presentados por el comportamiento de este tipo de suelo, se puede dividir en tres periodos.

El primero, antes de 1965, en el que se debía considerar la porosidad y el grado de saturación como variable, así como la validez del concepto de tensiones efectivas para los suelos no saturados con Bishop en 1959 y Aitchison en 1960; donde Bishop emplea el concepto de esfuerzo neto ($\sigma - u_a$) y succión ($u_a - u_w$) eran las más apropiadas a comparación de alguna forma de tensión efectiva para definir el estado tensional de un suelo no saturado (Bishop & Blight, 1963).

El segundo periodo, abarca desde el año 1965 a 1987, donde se plantea la posibilidad de dos variables de estado de esfuerzo con Matyas y Radhakrishna en 1968, implementando el concepto de superficie de estado para la representación gráfica de la relación entre las variables de estado: grado de saturación e índice de poros, y estado tensional; sometidos a carga de compresión isotrópica. Comprobando experimentalmente, que debido al fenómenos de histéresis se invalida la unicidad de la superficie de estado y estado tensional de suelos muy plásticos, ya que el cambio de saturación y de volumen debería ser en un solo sentido (de Agreda & Lloret Morancho, 1985). Durante 1980, Porter y Nelson estudiaron el comportamiento de pizarras expansivas en Montana y Colorado, dando como resultado trayectorias alternativas que llevaban al mismo estado tensional, indicando en una la disminución de la succión y después incrementar carga vertical y en la segunda, se iniciaba con una carga vertical y con esto reducir la succión, esto dio como resultado que el índice de poros no coincidiera (de Agreda & Lloret Morancho, 1985).

Y, por último, el tercer periodo desde 1987, incluyendo en el concepto de estado crítico y el límite elástico de suelos no saturados cuando se somete a ciclos de carga y descarga; en la actualidad se ha optado por enlazar el comportamiento de cambios volumétricos y resistencia al corte de los suelos no saturados con el desarrollo de modelos elastoplásticos.

En los avances más significativos para el estudio de suelos no saturados se encuentran (Meza Ochoa, 2012):

- El estudio de los suelos parcialmente saturados ha sido impulsado por aportaciones clave realizadas en distintas regiones del mundo. Entre los primeros trabajos que sentaron las bases teóricas de esta área destacan los desarrollados por Delwyn Fredlund en Canadá, Gordon Aitchison en Australia y Alan W. Bishop en el Reino Unido, quienes contribuyeron de manera significativa a la construcción de un marco científico para la comprensión del comportamiento de este tipo de suelos.
- En Inglaterra, el Imperial College ha sido un centro de referencia en el desarrollo experimental, donde investigadores como A. M. Ridley, K. Dineen y J. B. Burland han realizado importantes avances en el diseño de técnicas y dispositivos para la medición y el control de la succión del suelo, permitiendo una mejor caracterización de su comportamiento mecánico.
- En el ámbito europeo, la Universidad Politécnica de Cataluña ha destacado por sus investigaciones enfocadas en los fenómenos de expansión y colapso en suelos parcialmente saturados. Las contribuciones de investigadores como Eduardo Alonso han sido fundamentales para comprender la respuesta volumétrica del suelo ante cambios en las condiciones de humedad.
- Finalmente, en Sudamérica, la investigación en suelos parcialmente saturados ha tenido un desarrollo notable, particularmente en Brasil, donde las condiciones climáticas tropicales y la presencia predominante de suelos residuales han motivado numerosos estudios orientados a comprender su comportamiento y aplicación en la ingeniería geotécnica.

III. ESTADO DEL ARTE

3.1 Suelos No Saturados

3.1.1 Definición

Los suelos no saturados se pueden definir en un sistema trifásico que involucra agua, aire y partículas de suelo, en una descripción más detallada de cada capa se puede definir como:

- Fase sólida: son las partículas sólidas, involucra la forma, textura, composición química y mineral.

- Fase líquida: compuesta básicamente por agua, de la cual hay una subclasificación
 - Agua absorbida en la partícula
 - Agua capilar
 - Agua libre o intersticial
- Fase gaseosa: formada por aire o vapor de agua.

Dentro del análisis de suelos no saturados, algunos autores consideran una cuarta fase entre el agua y las partículas sólidas, esta membrana independiente se le llama membrana contráctil, que es una mezcla de agua libre y aire, esta membrana se puede caracterizar en dos casos (Ulloa Cortés, 2007):

1. El aire disuelto en el agua tiene un valor del 2% del volumen total del agua.
2. En el aire está presente el vapor de agua.

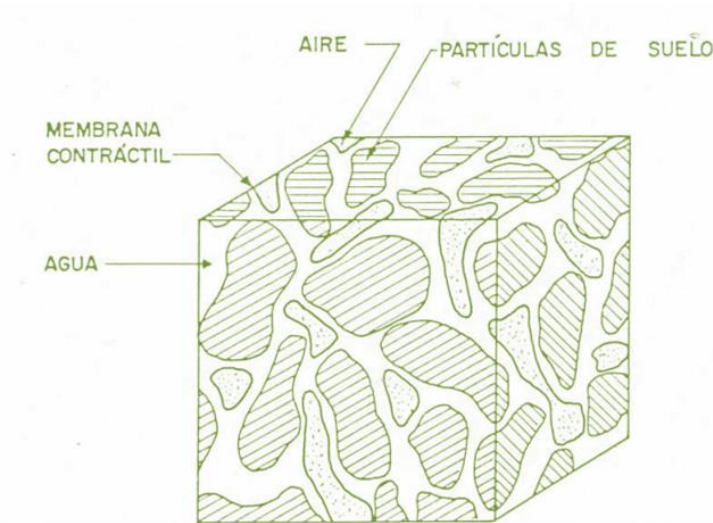


Figura 3 Fases del suelo (Fredlund & Morgenstern, 1977)

Esta fase solo se toma en cuenta teóricamente, ya que determina distintos coeficientes que rigen el comportamiento del suelo, pero debido a que el peso de esta se encuentra dentro del peso del agua, no se considera su volumen ni masa, por lo que, para esta investigación se tomará un sistema simplificado trifásico.

Algunos autores consideran una cuarta fase, que es la interfase entre el agua y partículas de suelo como fase independiente, tiene propiedades distintas a las del agua y aire, pero se considera como parte del peso del agua y no considerado en volumen (Fredlund & Morgenstern, 1977)

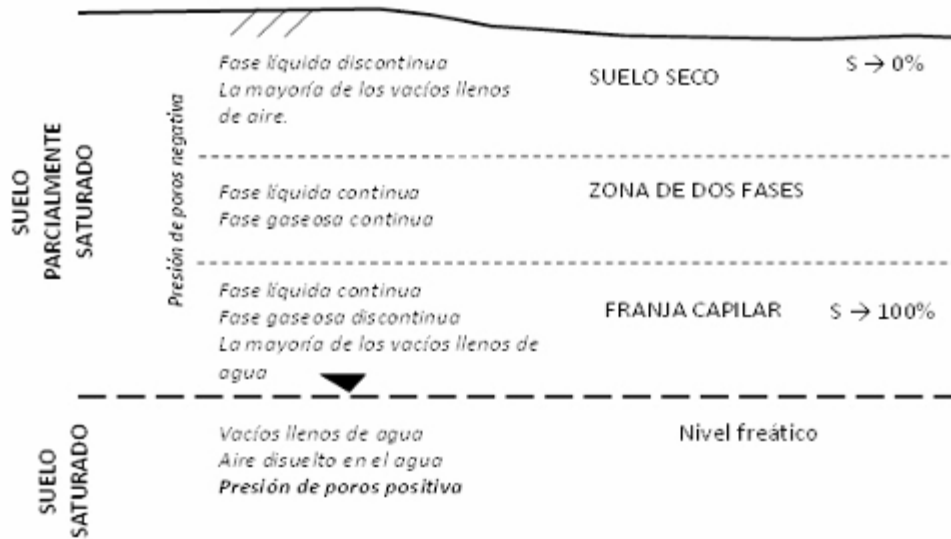


Figura 4 Zona de suelo saturado y parcialmente saturado (Fredlund, 2000)

En la **Figura 4**, se hace la representación de los estados del suelo. Los suelos que se encuentran bajo el nivel freático se consideran como zona saturada, lo cual indica que todos sus espacios vacíos están llenos completamente por agua y cuentan con una presión positiva (u_w), los que se ubican encima del nivel freático se define la zona de suelo seco, que es más cercano a la superficie del terreno, en esta zona los poros están ocupados por aire y su grado de saturación es de 0%. También existe la franja capilar, que es la más cercana al nivel freático donde los poros se encuentran ocupados de manera continua por agua, pero también pueden existir los que presentan burbujas de aire, siendo una fase gaseosa discontinua, el nivel de saturación puede estar cercano al 100% y esto se da por medio de capilaridad, los espacios ocupados por agua tienen una presión negativa ($-u_w$). Por último, entre la zona seca y la franja capilar se define como la zona de dos fases, donde el suelo esta parcialmente saturado, los poros son ocupados por agua y aire de manera continua, y el grado de saturación oscila entre el 20% y el 80% (Meza Ochoa, 2012).

3.1.2 Clasificación de suelos no saturados

Los suelos no saturados se pueden clasificar de dos maneras (de Agreda & Lloret Morancho, 1985):

- Suelos no saturados naturales
 - Sedimentarios: los cuales corresponden al 30% de la superficie de la Tierra, los cuales son eólicos, aluviales y coluviales.

- Residuales lateríticos son producto de meteorización y el tipo de la roca matriz, pueden contener mica la cual reduce la densidad seca, aumenta el contenido óptimo de agua, aumenta la expansión y reduce la capacidad de carga y el índice de plasticidad.
- Saprolíticos tropicales se encuentran en estado no saturados, esto debido a su alta permeabilidad y condiciones climáticas, la fracción arcillosa de estos suelos contiene óxidos hidratados de aluminio o hierro, pero en pequeñas cantidades por lo que no llegan a ser expansivos, tienen alta capacidad de carga cuando se humedecen y se compactan. La fracción limosa tiene una cementación por los óxidos, pero se pueden eliminar por dispersión y por último la fracción arenosa tiene mayor absorción de agua y alta densidad, pero resistencia inferior que una arena tradicional.

Suelos no saturados artificiales. Son aquellos suelos compactados por medios mecánicos, suelen usarse en obras de tierra como lo son presas, terraplenes, etc.; cuyo comportamiento está controlado por variables de estado, dependen del proceso de compactación, conocimiento de estado de esfuerzos y sus cambios de humedad a lo largo de su historia.

- Suelos colapsables

El colapso, definido por (Zur & Wiseman, 1975), como la disminución rápida de volumen del suelo, debido al aumento de alguno de los siguientes factores:

- Contenido de humedad
- Grado de saturación
- Esfuerzo medio actuante
- Esfuerzo cortante
- Presión de poro

Las características comunes de un suelos colapsables, de acuerdo a (Reginatto, 1970) son:

- Estructura macroporosa, esto indica un índice de poros alto o muy alto.
- Granulometría predominante fina, con fracciones de limo y de arcilla
- Estructura granular con contactos de arcilla, esto indica partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, que usualmente están unidas por acumulación de material arcilloso

De igual manera, los suelos colapsables se dividen en grupos dependiendo de sus características particulares, de acuerdo a (Uriel & Serrano, 1974):

- Grupo I: Involucra un rápido cambio de relación entre presiones efectivas y deformaciones sin que el suelo alcance su resistencia máxima, a este grupo pertenecen los limos o arcillas cementadas y rocas con gran porosidad.
- Grupo II: Presentan colapso sin cambio de condiciones, pertenecen los loess y algunas arcillas con sulfatos.
- Suelos expansivos

La expansión de suelos está relacionada con el aumento del volumen del suelo provocado por el humedecimiento del suelo, este aumento se debe a la disminución de esfuerzos intergranulares debido a la disminución de succión y provocando una expansión elástica; este fenómeno está asociado, generalmente con suelos arcillosos con densidades secas altas (Ulloa Cortés, 2007).

Los suelos arcillosos tienen tres mecanismos microestructurales que producen la expansión:

- Hidratación de partículas de arcilla
- Hidratación de cationes
- Repulsión osmótica

En un proceso de compactación, la expansión se puede presentar de distintas maneras dependiendo del método a emplear, energía de compactación o humedad inicial. Cuando se compacta del lado seco se producen estructuras floculadas y del húmedo, se presenta expansión; a mayor energía de compactación, mayor densidad seca y esto facilita la expansión, y cuando se emplea una compactación estática genera estructuras floculadas, esto genera más posibilidades de expansión (Ulloa Cortés, 2007).

3.2 Suelos compactados

3.2.1 Definición

La compactación es un método mecánico basado en la expulsión de aire de los poros del suelo y reducción del índice de vacíos a una humedad constante. La compactación genera en el suelo deformaciones permanentes que modifican las propiedades originales del suelo, derivando en las siguientes consecuencias (de Santos, 2019):

- Aumento de la densidad seca del suelo
- Aumento de su resistencia mecánica
- Aumento de su rigidez
- Reducción de permeabilidad
- Reducción de asentamientos

- Reducción de erosionalidad
- Reducción de expansión, contracción y expansión por congelamiento

Los suelos compactados que no se encuentran completamente saturados suelen presentar un comportamiento heterogéneo. A nivel microscópico, los espacios existentes entre los agregados pueden estar ocupados únicamente por aire o por una mezcla de aire y agua; por ello, desde una perspectiva macroscópica, este tipo de materiales se clasifica como suelo no saturado.

De igual manera, (Seed & Chan, 1959) analizaron el comportamiento tensión–deformación de suelos compactados a diferentes contenidos de humedad, tanto por debajo como por encima de la humedad óptima. Sus resultados mostraron que los suelos compactados en el lado seco del óptimo presentan una mayor rigidez estructural. En cambio, cuando la compactación se realiza en el lado húmedo del óptimo, la rigidez disminuye, aunque la resistencia al corte se mantiene prácticamente constante en ambos casos.

3.2.2 Tipo de compactación por suelo

Se debe de tener en cuenta que no todos los suelos se pueden compactar de la misma manera, de una manera general, para los suelos granulares se debe de emplear una compactación por vibración ya que esta permite que las partículas tengan una configuración más cerrada para la disminución de porosidad y aumento de fricción; los suelos finos, por otra parte, se compactan mediante impacto.

3.2.3 Métodos de compactación en laboratorio

Los métodos de compactación de suelos se pueden dividir en dos, los cuales son estáticos y dinámicos.

Dentro de los dinámicos se incluyen (Tauta et al., 2007):

- Compactación por impacto: consiste en colocar una cantidad de material con un contenido de humedad determinado en un molde cilíndrico y compactar aplicando un cierto número de golpes, como lo sería la prueba Proctor, que se encuentra sistematizada en la norma ASTM D698.

La energía de compactación aplicada se determina con

$$E = \frac{n * N * W * h}{v} \quad (1)$$

Donde:

N es el número de capas

n es el número de golpes en cada capa

W es el peso del pisón

h es la altura de caída del pisón

v es el volumen del molde

3.2.3.1 Prueba Proctor

El ensaye de compactación Proctor es debido al Dr. R. R. Proctor, que consiste en compactar el suelo por medio de impacto, se le va añadiendo un porcentaje de humedad al suelo y alcanza una densidad máxima y, al superar una cierta humedad, las densidades disminuirían debido a que el agua tiende a ocupar los espacios vacíos que aún quedan entre partículas sólidas; cuando se llega al máximo peso específico seco con ese contenido de agua, se le llama contenido de agua óptimo, y hay dos variantes de este (Rosetti & Begliardo, 2005):

- Proctor Estándar. Esta variante consiste en compactar la muestra de suelo en 3 capas, aplicando 25 golpes entre cada una de las capas con un pisón de 2.5 kg de peso, dejándolo caer desde una altura de 30.5 cm.
- Proctor Modificada. Esta variante fue introducida en la Segunda Guerra Mundial, debido a las demandas de los vehículos militares que eran más pesados, se aumentaron las capas a 5, el número de golpes a 55, el peso del pisón a 4.5 kg y la altura de caída a 45.7 cm.

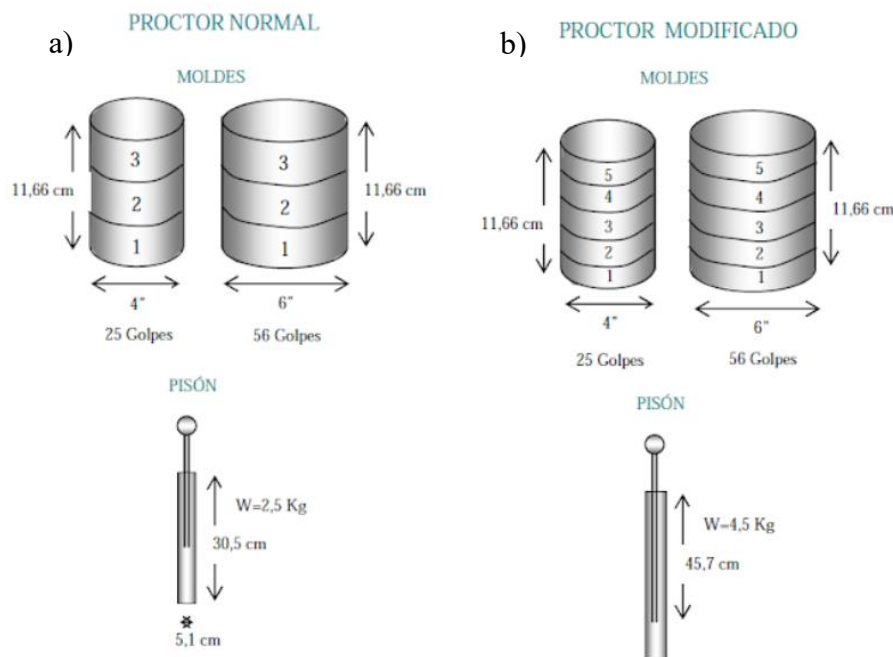


Figura 5 a) Proctor Estándar, b) Proctor Modificada

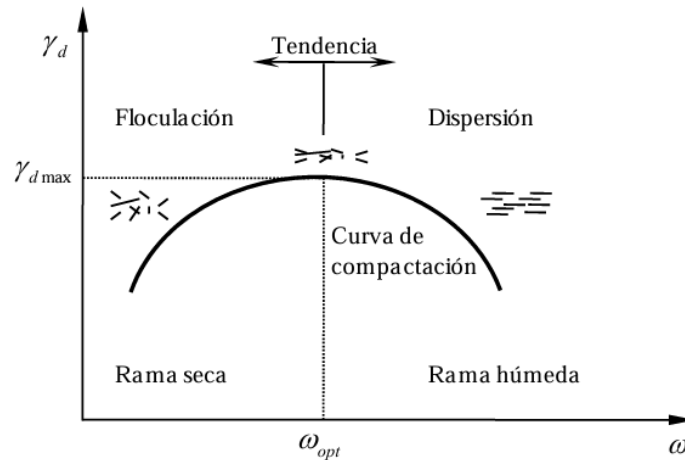


Figura 6 Estructura alcanzada por el suelo según el punto de compactación

En los métodos estáticos se encuentran (Juárez E, 2009):

- Harvard Miniatura. Es empleado en materiales finos, plásticos y con partículas menores a 2 mm, desarrollado por el profesor S.D. Wilson. Consiste en la compactación de suelo por medio de presión, en una cámara cilíndrica metálica y una barra metálica, que se emplea como émbolo y aplica presión.



Figura 7 Equipo de compactación Harvard (ELE Internacional Ltda., 1993)

- Compactación giratoria. Consiste en la aplicación de presión vertical y acción giratoria, con un ángulo de inclinación respecto al eje vertical, desarrollada en 1939 en Texas

Highway Institute y en 1962 se estudió la compactación giratoria de materiales utilizados en materiales de subbases y bases granulares.

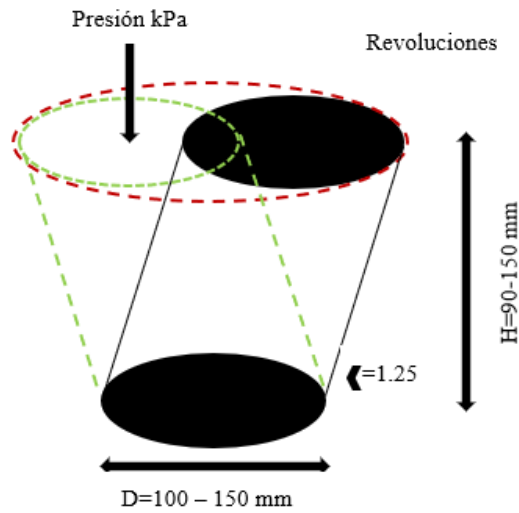


Figura 8 Acciones ejercidas en el compactador giratorio (Tauta et al., 2007)

3.3 Succión

Este concepto fue desarrollado en la física de los suelos en los años 1900s uniendo el sistema impulsado por Buckingham de agua-suelo-plantas y el uso de la succión en la termodinámica por Croney y Coleman (Meza Ochoa, 2012).

La succión total es la cantidad de energía que el suelo tiene para retener agua (Lee & Wray, 1995), también suele ser definida como la energía necesaria para remover una molécula de agua del suelo por medio de la evaporación (Ridley, 1993).

Esta succión involucra dos componentes, uno asociada a la capilaridad (succión matricial) y el otro el contenido de sales disueltas en el agua (succión osmótica); se expresa en la siguiente ecuación.

$$\psi = \psi_m + \pi \quad (2)$$

Donde:

ψ_m es la succión matricial

π es la succión osmótica

La **succión matricial** se expresa en (Dineen, 1997):

$$\psi_m = u_a - u_w \quad (3)$$

Donde:

ψ_m es la succión matricial

u_w es la presión del agua en los poros

u_a es la presión de aire en los poros

El valor de la succión matricial depende del tamaño y acomodo de las partículas, así como del tamaño de los poros y grado de saturación, esto implica que si la saturación aumenta la succión disminuye y viceversa.

La **succión osmótica (π)**, por otra parte, es la componente asociada las sales disueltas en el agua; las sales disueltas reducen la presión de vapor, por lo tanto, se requiere mayor energía para remover el agua.

3.3.1 Medición de succión

Existen diversos métodos para medir la succión de suelos, se pueden dividir en métodos directos e indirectos. Los métodos directos miden la presión negativa del agua y aire de los poros para obtener la succión y los indirectos se basan en el equilibrio de humedad del suelo (presión de vapor, contenido de humedad o propiedades físicas) (Meza Ochoa, 2012).

Tabla 1 Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición (Meza Ochoa, 2012).

Componente de succión medida	Técnica/sensor	Rango de succión medido en kPa	Ensayo de campo o laboratorio
Succión matricial	Tensiómetros	0-100	Campo y laboratorio
	Técnicas de traslación de ejes	0-1,500	Laboratorio
	Sensores de conductividad eléctrica y conductividad térmica	0-400	Campo y laboratorio
	Papel filtro en contacto	Rango completo	Campo y laboratorio
Succión total	Psicrómetros termopares	100-8,000	Campo y laboratorio
	Técnica de espejo enfriado	1,000-450,000	Laboratorio
	Papel filtro en "no contacto"	1,000-500,000	Campo y laboratorio

El método para determinar la succión a emplear, es el método de papel filtro; este método implica que cuando se alcanza la humedad de equilibrio con el suelo se puede determinar con el contenido de agua que tiene el papel filtro. Este procedimiento esta estandarizado en la norma ASTM D 5298-10.

3.3.2 Capilaridad

La capilaridad es un fenómeno físico propio de los líquidos que permite su ascenso en contra de la fuerza de la gravedad hasta alcanzar una determinada altura capilar. Esta altura depende de diversos factores, entre los que se incluyen la tensión superficial (T_s), las fuerzas de adhesión entre

el líquido y el sólido, las características del material del conducto —representadas por el ángulo de contacto (α)— y el diámetro del tubo capilar (d). Este comportamiento se analiza comúnmente a través del modelo conceptual conocido como el “tubo capilar”, el cual permite explicar de manera simplificada el mecanismo de ascenso del líquido.(Meza Ochoa, 2012).

Este fenómeno se presenta en suelos con presencia al nivel de agua freática, el agua asciende por los poros del suelo y se forma la franja capilar mencionada anteriormente.

$$R \geq \frac{2T_s \cos \theta}{s} \quad (4)$$

Donde:

T_s representa el esfuerzo tensional en la interfase de agua y aire

θ es el ángulo de contacto entre agua y los minerales del suelo.

3.4 Curvas de retención agua – suelo

La curva característica de retención de agua, identificada por White en 1970 (Fredlund, 2000), describe el comportamiento del suelo frente a la pérdida de humedad y se divide en tres zonas definidas. La primera corresponde a la zona de saturación completa o efecto de borde, donde el suelo mantiene un alto grado de saturación y la succión es mínima. Al aumentar la succión, se alcanza el valor de entrada de aire, que marca el inicio de la zona de transición, donde el agua comienza a salir de los poros grandes. Finalmente, con la continua reducción del contenido de agua, se alcanza la zona de saturación residual, donde la fase líquida deja de ser continua, la conductividad hidráulica disminuye drásticamente y los poros están ocupados predominantemente por aire (Meza Ochoa, 2012).

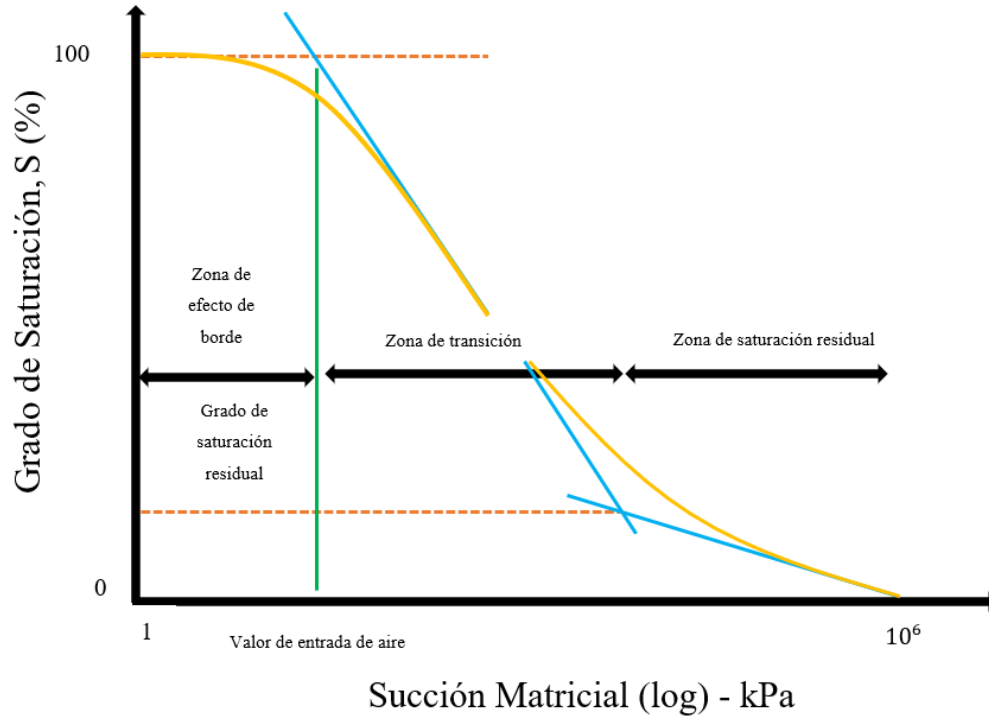


Figura 9 Curva Retención Agua – Suelo. Tomada de (Meza Ochoa, 2012)

La siguiente ecuación, propuesta por (Fredlund & Xing, 1994) en función del contenido de agua

$$\theta = C(\psi) \left\{ \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right\}^m \quad (5)$$

Donde:

θ es el contenido volumétrico de agua a cualquier valor de succión.

Ψ es la succión en el suelo en kPa.

$C(\Psi)$ es la función de corrección.

θ_s es el contenido volumétrico de agua del suelo en estado de saturación.

e es la base de logaritmo natural: 2.71828...

a es la succión relacionada con el valor de entrada de aire (punto de inflexión de la curva).

n es el parámetro del suelo relacionado con la pendiente de la curva en el punto de inflexión.

m es el parámetro de ajuste relacionado con los resultados cerca del contenido residual de agua

La función $C(\psi)$ está definida de la siguiente manera:

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{1\,000\,000}{\psi_r} \right)} \right] \quad (6)$$

En la figura siguiente se muestran las CRAS representativas de distintos suelos

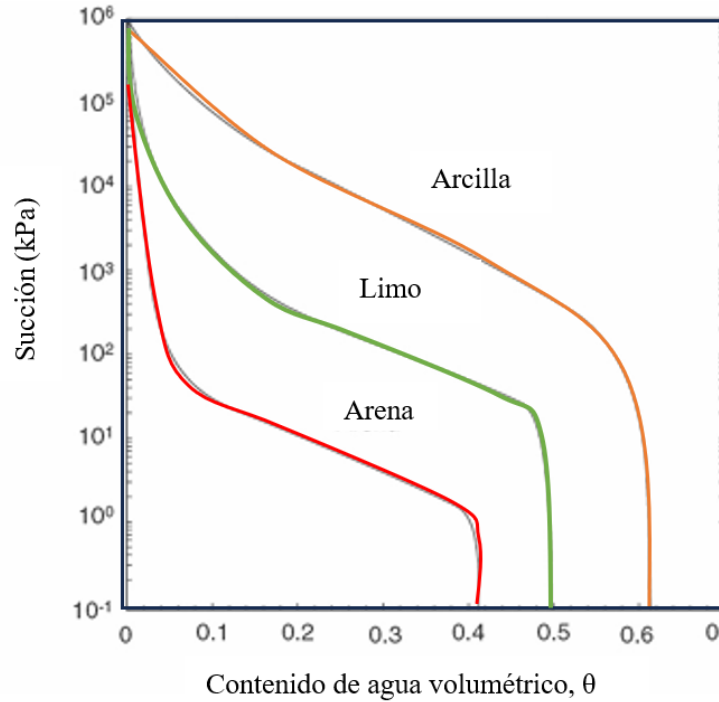


Figura 10 Curvas características de succión representativas para arenas, limos y arcillas. Tomado de Lu Ning y Likos W. J., 2004.

3.5 Esfuerzos efectivos

El concepto de esfuerzos equivalentes se emplea por Terzaghi en 1923 y en 1936 se establece formalmente este principio con las siguientes hipótesis (Terzaghi, 1936):

- Las partículas sólidas son incompresibles
- El área de contacto entre dos partículas es independiente de la presión de confinamiento y puede ser despreciada.

A finales de la década de los 50s los investigadores se concentraron en el comportamiento de los suelos no saturados, empleando nuevas ecuaciones para los esfuerzos efectivos, dando lugar a la propuesta de (Bishop, 1959):

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (7)$$

Donde:

u_a es la presión de aire

X es el parámetro relacionado al grado de saturación (S_w)

$(u_a - u_w)$ es la succión del suelo (s)

$(\sigma - u_a)$ es el esfuerzo neto (σ_{nt})

De esta manera, el concepto de esfuerzos efectivos de Bishop se tomó como parte de todos los modelos propuestos para definir el comportamiento de los suelos no saturados.

Ecuación	Descripción de variables	Autor	Año
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	σ' : Esfuerzo efectivo σ : Esfuerzo total β' : Factor de unión que es una medida del número de uniones bajo tensión efectiva para contribuir a la resistencia al corte del suelo u_w : Presión de agua en los poros	Croney et. al	1958
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	u_a : Presión de aire en los poros χ : Parámetro relacionado al grado de saturación del suelo	Bishop	1959
$\sigma' = \sigma - \psi p^w$	p^w : Presión de agua negativa en los poros tomada como un valor positivo ψ : Succión con valores de 0 a 1	Aitchison	1961
$\sigma' = \sigma - \beta p^w$	β : Factor estadístico del mismo tipo como el área de contacto	Jennings	1961

$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi_m(h_m + u_a) + \chi_s(h_s + u_a)$	χ_m : Parámetro de esfuerzo efectivo para la succión matricial h_m : Succión matricial χ_s : Parámetro de esfuerzo efectivo para la succión osmótica	Richards	1966
$\sigma' = \sigma * \chi_m p_m^w + \chi_s p_s^w$	p_m^w : Succión matricial p_s^w : Succión osmótica χ_m y χ_s ; Parametros del suelo dependientes de la ruta de esfuerzos, con valores de 0 a 1	Aitchison	1973

Tabla 2 Ecuaciones de esfuerzos efectivos presentadas por diversos autores (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Cuando se involucra la intrusión y retracción de agua en una red porosa se observan tres tipos de zonas (Rojas, 2022):

- Zona Saturada (Vs). Los sólidos están rodeados exclusivamente de poros saturados
- Zona no saturada (Vu). Los sólidos están rodeados de por una combinación de poros saturados y no saturados
- Zona seca (Vd). Los sólidos están rodeados exclusivamente por poros secos.

Estas zonas aumentan o disminuyen su tamaño, hasta desaparecer dependiendo de la succión de este. Se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{V^s + V^u + V^d}{V} = f^s + f^u + f^d = 1 \quad (8)$$

Donde:

f^s es la fracción saturada

f^u es la fracción no saturada

f^d es la fracción seca

Para la zona saturada se designa con

$$f^s = \frac{V^s}{V} \quad (9)$$

La zona seca se determina con

$$f^d = \frac{V^d}{V} \quad (10)$$

Y, por último, la zona no saturada se obtiene con

$$f^s = \frac{f^u}{f^d} = 1 \quad (11)$$

Cada zona tiene un comportamiento diferente, la saturada aplica la ecuación de Terzaghi

$$p'^s = p - u_w \quad (12)$$

Para la zona seca, se emplea la ecuación

$$p'^d = p - u_a = \bar{p} \quad (13)$$

Y, por último, para la zona no saturada se emplea

$$p'^u = \bar{p} + \chi^u s = \bar{p} + S_w^u s \quad (14)$$

Considerando que el esfuerzo efectivo de las tres zonas es el esfuerzo efectivo del suelo no saturado, se define con

$$p' = \sum_{i=1}^3 f^i p'^i = f^s(p - u_w) + f^u(\bar{p} + S_w^u s) + f^d \bar{p} = \bar{p} + \chi s \quad (15)$$

Por lo tanto, el parámetro de Bishop en general se obtiene con

$$\chi = f^s + f^u S_w^u \quad (16)$$

3.6 Modelos constitutivos

Los modelos constitutivos representan una definición matemática para el comportamiento de un material, pero no es posible tener en consideración todos los aspectos de que los afectan, por lo tanto, es necesario hacer idealizaciones del material (Desai, 2005).

Los modelos constitutivos se dividen en dos grupos:

- Empíricos

Los modelos empíricos se establecen bajo condiciones específicas de carga y una base experimental, que más adelante con recursos estadísticos se determinan ecuaciones de comportamiento con mayor exactitud en un determinado material.

- Analíticos

Son aquellos en los que se aplican leyes físicas para descubrir la respuesta esfuerzo – deformación de un material.

También, dentro de los modelos constitutivos del suelo se pueden clasificar de acuerdo a los siguientes criterios (Gens & Potts, 1988):

- Modelos lineales y no lineales
- Modelos elásticos, plásticos y elastoplásticos
- Modelos estáticos y dinámicos (reológicos)

3.7 Modelo sólido – poroso

El modelo sólido-poroso consiste en una red de poros formada por cavidades o sitios y los conectores o enlaces. Las cavidades ocupan el mayor volumen de poros, de forma circular bidimensional o tridimensional y los enlaces, su volumen es insignificante con formas rectangulares. Se establece un principio constructivo para evitar la intersección entre enlaces en un solo sitio.

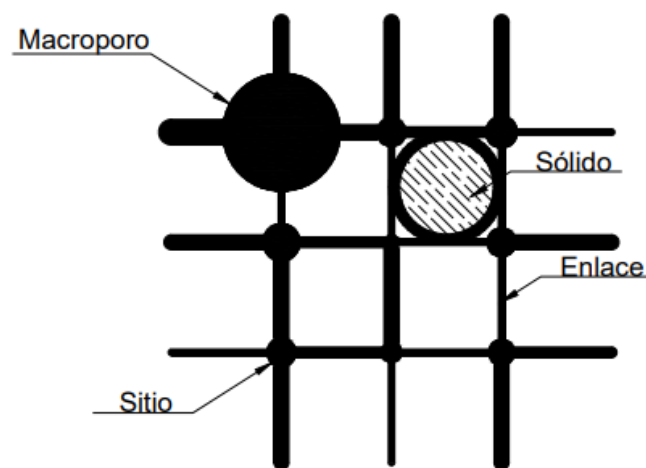


Figura 11 Red porosa mostrando enlaces, sitios, macroporos y sólidos (Rojas et al., 2011)

El incumplimiento de este sistema de diseño da como resultados fenómenos de redistribución y segregación que crean regiones de poros pequeños y otros poros grandes, simulando la estructura de materiales bimodales con micro y macroestructuras.

Para la construcción del modelo se debe contar con las distribuciones de tamaño de grano y poro del suelo, para obtener el poro del suelo se debe hacer un ajuste en el cuadro numérico en la curva de retención de agua en el suelo. Se requiere el tamaño medio (R) y desviación estándar (d) para

establecer la distribución de cada elemento (cavidades y enlaces) en materiales estructurados individuales.

La distribución por tamaño de cavidades afecta principalmente a la curva de humedecimiento, debido a que su funcionamiento se puede generalizar como los poros grandes son los últimos en saturarse, y los enlaces afectan directamente a la curva de secado, ya que los poros pequeños son los últimos en secarse.

Por último, el tamaño medio y la desviación estándar de los micro y macroporos influyen en la curva de retención que correspondiente a los valores de succión. Después de crear el modelo sólido-poroso, se simulan los procesos de humedecimiento y secado utilizando la ecuación de Young-Laplace (Rojas, 2022).

En este caso se representa el incremento o reducción de la succión del suelo, con esto es posible determinar cuáles poros están secos o saturados para así obtener la curva de retención de agua en el suelo.

Con la simulación de secado y humedecimiento es posible definir los parámetros f_s , f_u y $S_w u$, que se requieren para obtener el parámetro χ de Bishop. Las cuales se pueden definir cuando se tiene el volumen de los poros saturados, secos y no saturados que rodean los sólidos.

También es necesario incluir el fenómeno de acoplamiento hidromecánico en este modelo, considerando que sólo los macroporos reducen su tamaño durante la deformación volumétrica plástica; se hace la inclusión en tres diferentes maneras:

- Modificando el número de macroporos
- Modificando el tamaño de macroporos
- La combinación de los dos anteriores.

En el primer caso es necesario incluir el factor de volumen relativo de macrocavidades, el cual relaciona el radio entre micro y macrocavidades. Para obtener el volumen de macrocavidades se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$V_{MC} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{q_{MC}}{\log \delta_{MC}} \sum_{R_{MC}}^{\infty} e^{\left(\frac{1}{2}\right) \left(\log \left(\frac{R_{MC}}{R_{MC}^D}\right) / (\log \delta_{MC})^2\right)} * R_{MC}^D F_D(\Delta R_{MC}) \quad (17)$$

Donde:

ΔR_{MC} es el tamaño inicial de las macrocavidades

$\overline{R_{MC}}$ es el incremento de las macrocavidades

δ_{MC} es la desviación estándar de las macrocavidades

F_D es el factor de dimensión del área o volumen de las cavidades dependiendo de la dimensión de la red

q_{MC} es el factor de volumen inicial relativo

Cuando se produce una deformación plástica volumétrica se representa con:

$$q_{MC} = q_{MC0} \left\{ 1 - \frac{V_0 \varepsilon_v^p}{V_{MC} [1 +]} \right\} \quad (18)$$

Donde:

q_{MC0} es el factor de volumen inicial relativo

V_0 es el volumen inicial de la muestra

ε_v^p es la deformación volumétrica plástica

V_{MC} es el volumen inicial de macrocavidades

3.8 Modelo Elastoplástico para suelos compactados

En esta sección se describe un marco elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos ligeramente compactados.

El comportamiento mecánico de los materiales geotécnicos presenta fenómenos de fluencia, deformaciones irreversibles y dilatancia inducida por tensiones de corte (Gens & Potts, 1988). (Rojas, 2022) desarrolló un modelo elastoplástico del comportamiento volumétrico de suelos no saturados, modela el comportamiento de colapso por humedecimiento por medio de un modelo sólido – poroso, capaz de simular el agua en los poros en cualquier trayectoria.

En el modelo sólo se aplica en muestras inicialmente saturadas sometidas a secado, indicando

- SIYS como la superficie de aumento de succión
- SDYS es la superficie de disminución de succión
- LCYS es superficie de carga – colapso

En la Figura 12, se observa el punto A el cual indica el esfuerzo de succión de una mezcla agua – suelo, después es compactado con un pistón, durante la carga el volumen disminuye y el grado de saturación aumenta, esto indica una disminución de la succión, esto se representa en la trayectoria AB.

Al retirar la carga de compactación, la succión aumenta e incluso supera el valor inicial; si se realiza la descarga antes del secado hay un aumento de la resistencia aparente, la resistencia antes mencionada y el endurecimiento por succión son fenómenos complementarios.

La trayectoria LCYS indica el esfuerzo máximo experimentado, el cual es la carga de compactación.

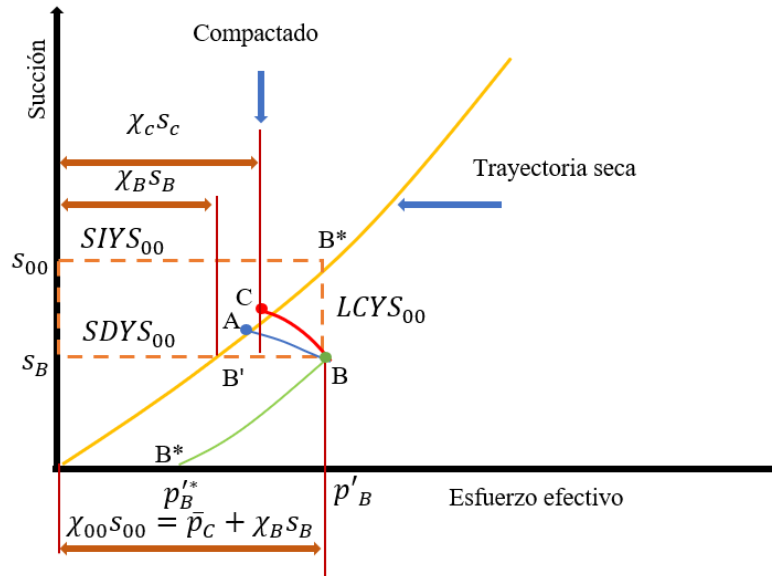


Figura 12 Modelo elastoplástico para el comportamiento volumétrico de suelos ligeramente compactados en suelo húmedo (Rojas, 2022)

Cuando se presenta un aumento en el esfuerzo de preconsolidación, ya sea por el esfuerzo de succión o esfuerzo neto, al ser independientes entre sí, la otra deberá alcanzar este mismo valor para producir las deformaciones elastoplásticas.

producir una deformación volumétrica plástica. Cada incremento en el esfuerzo medio produce un mayor desplazamiento e inclinación de la LCYS, la combinación de desplazamiento e inclinación de LCYS, sumado a un aumento de esfuerzos efectivos debido a la aplicación de cargas, da como resultado el colapso por humedecimiento del suelo cargado con un incremento de esfuerzos (Rojas et al., 2015).

Al incorporar el acoplamiento hidromecánico durante la etapa de carga del punto C al D, se presenta una reducción del volumen de la muestra, el grado de saturación aumenta y la succión se reduce, al mantener la succión constante, se drena una cantidad de agua y por esto la succión varía, dando paso al desplazamiento de SWRC sobre el eje de succión; la combinación de esto da como resultado un pequeño colapso y afecta la pendiente de la curva de compresión, con la adición del colapso se logra una correcta simulación del comportamiento volumétrico de los suelos durante la compresión drenada.

Durante la etapa de igualación posterior a la compactación, la muestra de suelo fue sometida a la aplicación de una succión controlada (s_0) y un esfuerzo neto medio (p_e), con el objetivo de estabilizar su estado tensional antes del proceso de secado. A medida que la muestra comenzó a secarse, siguió una trayectoria de secado parcial hasta interceptar la curva principal de secado, alcanzando finalmente el punto D, donde el esfuerzo efectivo medio se representó por $p'D$.

En este punto, la superficie de carga (LCYS) se desplazó respecto a la trayectoria de secado debido al fenómeno de endurecimiento por succión, asociado al incremento en el esfuerzo de succión total. Este comportamiento indica un aumento en la resistencia aparente del suelo por efecto del secado, siendo el desplazamiento de la LCYS una consecuencia directa del acoplamiento hidromecánico. Posteriormente, al aplicar un incremento adicional de esfuerzo neto ($\Delta p'$) que lleva el estado de esfuerzos más allá de la zona elástica, la LCYS se inclina y se desplaza hacia una nueva posición (LCYSH), lo que refleja el endurecimiento por carga y la aparición de una nueva superficie de fluencia correspondiente al punto J. Este desplazamiento puede evaluarse igualando las deformaciones volumétricas plásticas desarrolladas durante la carga y la descarga, considerando la influencia conjunta de los esfuerzos efectivos y de succión.

Tras la carga, el humedecimiento progresivo de la muestra genera inicialmente una recuperación elástica (entre los puntos H e I), seguida de un colapso estructural conforme la succión disminuye y el suelo se aproxima a la saturación. Cuando la trayectoria de humedecimiento intercepta la superficie de descarga (SDYS00) en el punto L, esta se desplaza hacia una posición inferior,

alcanzando la condición saturada representada por la línea SDYSM. El grado de colapso experimentado es proporcional a la variación del esfuerzo de succión, evidenciado por la distancia horizontal entre la LCYS y la trayectoria de humedecimiento. Durante este proceso, la LCYS se actualiza para coincidir con la nueva posición de la trayectoria húmeda, describiendo adecuadamente la pérdida de rigidez y la reorganización volumétrica del material. Este marco elastoplástico, basado en los conceptos de endurecimiento por carga y por succión, permite representar de forma coherente el comportamiento de suelos compactados, tanto ligeramente como altamente densificados, capturando la transición entre estados elásticos, plásticos y de colapso inducido por humedecimiento. Para la deformación volumétrica de suelos no saturados se emplean las siguientes ecuaciones:

$$d\varepsilon_v = \frac{de}{e} = -\lambda_v \frac{dp'}{p'} \quad (19)$$

$$\frac{de}{e} = \left(\frac{p'_0}{p'} \right)^{\lambda_v} \quad (20)$$

Donde:

p'_0 es el esfuerzo efectivo inicial

v_0 es el volumen en la línea de consolidación virgen

$$\frac{de}{e} = \lambda_e \frac{dp'}{p'} \quad (21)$$

Donde:

λ_e es la pendiente de la línea de compresión en un plano logarítmico de la relación de esfuerzos efectivos contra relación de vacíos.

$$\frac{e}{e_0} = \left(\frac{p'}{p'_0} \right)^{\lambda_e} \quad (22)$$

Para motivo de esta investigación, se empleará el modelo elastoplástico para suelos compactados, en este modelo se tuvieron en cuenta los distintos caminos de carga, incorporando el grado de saturación y la historia de compactación que sufrió la muestra.

Este modelo asume el comportamiento isotrópico y únicamente se enfoca en deformaciones volumétricas, permite simular expansión y contracción volumétrica, esto facilita la interpretación unificada del comportamiento volumétrico.

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Este modelo necesita los siguientes parámetros de calibración que se obtienen mediante las siguientes pruebas experimentales:

- Ensayos de compactación bajo distintas condiciones de carga
- Curvas de retención de humedad

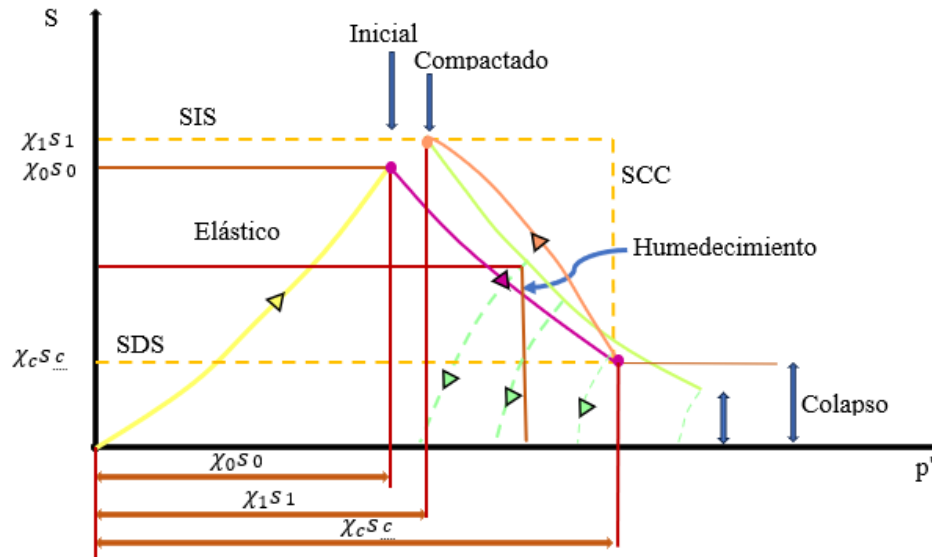


Figura 15 Modelo de suelos compactados

IV. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta de manera detallada el desarrollo del procedimiento experimental seguido en la investigación, el cual permitió obtener los parámetros requeridos para la formulación del modelo aplicado a suelos compactados. A partir de estos resultados, se llevaron a cabo posteriormente las comparaciones entre los valores teóricos y los obtenidos experimentalmente. Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la Universidad Autónoma de Querétaro.

La metodología se divide en:

- Recolección de muestras alteradas e inalteradas
- Obtener propiedades índices del suelo
 - Peso específico relativo de sólidos de acuerdo a la norma ASTM D854
 - Contenido de humedad del suelo de acuerdo a la norma ASTM D2216
 - Peso volumétrico de la masa de suelo de acuerdo a la norma ASTM D4531
 - Análisis granulométrico por tamizado y vía hidrómetro de acuerdo a la norma ASTM D422
 - Límites de consistencia de acuerdo a la norma ASTM D4318
 - Clasificación de suelos de acuerdo a la norma ASTM D2487
- Obtención de la compactación del suelo mediante métodos dinámicos y estáticos.
- Determinación de la Curva de Retención Agua–Suelo (CRAS).
- Realización de ensayos mecánicos para la caracterización del comportamiento del suelo.
- Desarrollo del modelo matemático para la simulación del comportamiento del suelo compactado.
- Análisis e interpretación de resultados.
- Redacción de conclusiones.

4.1 Recolección de muestras

Las muestras fueron recolectadas por el laboratorio de Geotecnia, de manera inalterada, se hizo de manera manual mediante pozo a cielo abierto y de ahí la obtención del cubo de dimensiones de 50X50 cm, para conservar su humedad y obtener sus propiedades naturales se envolvió en hule para emplear, la cual fue transportada a dicho laboratorio en la Universidad Autónoma de Querétaro; de ahí se tomó para el desarrollo de esta investigación.

4.2 Caracterización del suelo

Este proceso implica determinar las propiedades índices del suelo, siguiendo los procedimientos establecidos por las normas correspondientes. Luego, con base en estos resultados, se clasifica el suelo utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (norma ASTM D2487).

4.2.1 Contenido de humedad (ω)

La determinación del contenido de humedad debe hacerse tanto en muestras inalteradas como alteradas, con el fin de obtener el perfil de humedad natural del terreno. Este procedimiento se lleva a cabo conforme a la norma ASTM D2216.

4.2.2 Peso específico del suelo (γ_m)

Se empleó el método B de la norma ASTM D4531 para obtener el peso específico del suelo, el cual consiste en cubrir muestras inalteradas en parafina, hasta crear una capa impermeable, para a continuación sumergirlas en agua y así obtener su peso sin compactar.

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad (23)$$

Donde:

W_m es el peso de la muestra (gr)

V_m es el volumen de la muestra (cm³)



Figura 16 Determinación del peso específico de la muestra

4.2.3 Peso específico relativo de sólidos (S_s)

Se realiza conforme a la norma ASTM D854 para calcular la relación entre el peso de los sólidos del suelo y el volumen que ocupan, sin incluir los vacíos.

Se obtiene con la siguiente formula:

$$S_s = \frac{W_s}{V_s * \gamma_w} \quad (24)$$

4.2.4 Análisis Granulométrico

El procedimiento comienza con el lavado del material utilizando la malla No. 200. Posteriormente, el material que queda retenido se somete a un análisis granulométrico por medio de tamices, empleando las mallas No. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200, conforme a lo establecido en las normas ASTM C136 y ASTM C117.



Figura 17 Muestra total para granulometría



Figura 18 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico del material que atraviesa la malla No. 200 se lleva a cabo mediante el método del hidrómetro (o densímetro), conforme a lo indicado en la norma ASTM D422 (ver Figura 31). Este método se basa en la ley de Stokes, la cual establece una relación entre la densidad y la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo con su tamaño o diámetro.

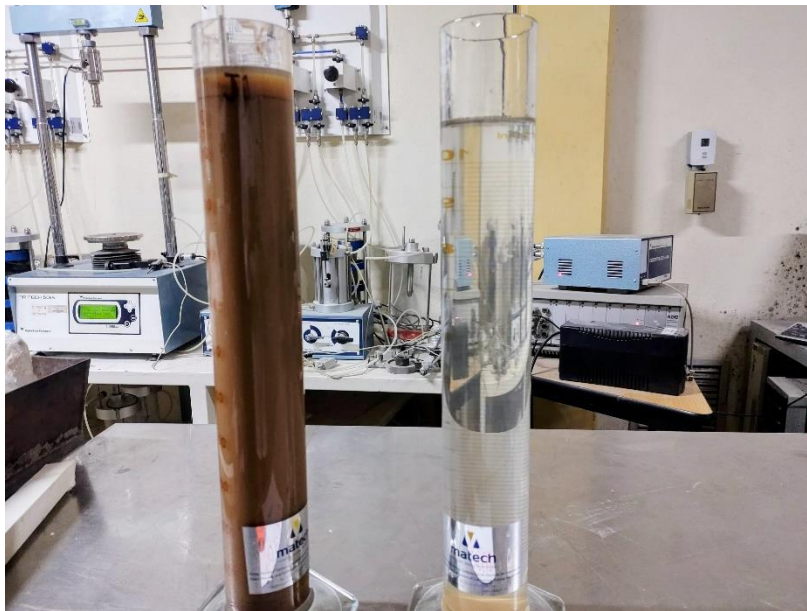


Figura 19 Análisis granulométrico con hidrómetro

4.2.5 Límites de Consistencia

En los suelos finos, los límites de consistencia se basan en el hecho de que el comportamiento físico del material está estrechamente relacionado tanto con las propiedades de sus partículas como

con el contenido de humedad. En función de esta relación, el suelo puede presentarse en distintos estados, que van desde sólido y semisólido hasta plástico y líquido.

La identificación de las transiciones entre estos estados se realiza mediante la determinación del límite líquido (LL), el límite plástico (LP) y el índice de plasticidad (IP). Estos parámetros se obtienen empleando el dispositivo de Casagrande, de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma ASTM D4318.



Figura 20 Determinación de límite líquido

La determinación del límite de contracción lineal (SL) y de contracción volumétrica (SV) se realiza conforme a lo establecido en la norma ASTM D427. No obstante, por razones de seguridad, en lugar de utilizar mercurio, las mediciones de las muestras se efectúan con un vernier.

4.2.6 Clasificación del suelo

Con los parámetros obtenidos a partir de las pruebas previamente realizadas, se procede a clasificar el suelo siguiendo los criterios establecidos para materiales de grano fino, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este procedimiento se encuentra descrito en la norma ASTM D2487

4.3 Compactación de suelo

Para la compactación del suelo se realizó un ensaye Proctor estándar y modificado normado en ASTM D698, para la compactación estática se hizo en base a la relación de vacíos obtenida de la compactación dinámica.

4.3.1 Compactación dinámica

Se calculó la energía de compactación equivalente asociada al ensayo Proctor Modificado y Estándar. Dicha energía se determinó a partir del número de golpes, número de capas, peso del martillo, altura de caída y volumen del molde, conforme a la expresión clásica de energía de compactación.

Se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$Ec = \frac{N*n*W*h}{V} \quad (25)$$

Donde:

N es el número de golpes por capa

n es el número de capas

W es el peso del pisón

h es la altura de caída del pisón

V es el volumen del suelo compactado

Proctor estándar

En esta variante se compacta la muestra de suelo en 3 capas, aplicando 25 golpes entre cada una de las capas con un pisón de 2.47 kg de peso, dejándolo caer desde una altura de 30 cm en un molde con un volumen de 936.96 cm³.

Proctor modificado

En esta variante se compacta la muestra de suelo en 5 capas, aplicando 56 golpes entre cada una de las capas con un pisón de 4.53 kg de peso, dejándolo caer desde una altura de 47 cm en un molde con un volumen de 936.96 cm³.



Figura 21 Compactación Proctor

4.3.2 Compactación estática

Para esta compactación se tomó la relación de vacíos de las Proctor realizadas, esta se hizo en una prensa en la que se aplicó una carga constante, esta relación de vacíos se obtuvo con la densidad de peso seco (γ_d), el volumen de los moldes y la humedad óptima.

El proceso específico para la realización de las muestras estáticas se hace respecto al peso volumétrico seco de cada una de las Proctor.

Para la elaboración de las muestras estáticas se hizo el cálculo de la cantidad de suelo y agua necesario para llegar al peso volumétrico seco que indica cada uno de las Proctor; esto dependiendo del volumen del anillo que se iba a emplear en cada consolidación.

La cantidad de agua y suelo se colocaron en el anillo y se procedió a hacer la compactación en la prensa, para tener la compactación de manera uniforme se implementó un pisón marcado hasta el límite donde es necesario llegar para que el material quedé compactado específicamente en el anillo.

La compactación estática se realizó utilizando una prensa Marshall equipada con un anillo dinamométrico con constante de 0.818 kg/división. La muestra, de 7.7 cm de diámetro, fue compactada en una sola capa mediante la aplicación gradual de carga, alcanzando un total de 480 divisiones en el anillo. La carga aplicada fue de 392.64 kg, lo que corresponde a un esfuerzo de compresión vertical de 8.98 kg/cm² para una muestra parecida a Proctor estándar, calculado a partir del área transversal de la muestra y un valor de 75.75 kg/cm² para la Proctor modificada.



Figura 22 Compactación estática para consolidación



Figura 23 Esquema conceptual del procedimiento de compactación estática. Fuente: Elaboración propia con apoyo de herramientas de inteligencia artificial generativa.

4.4 Obtención de curva de retención agua – suelo

Para obtener la curva de retención agua–suelo del material analizado, es fundamental medir la succión (s) en diferentes niveles de saturación. En este estudio, dicha medición se realiza mediante la técnica del papel filtro, la cual permite determinar tanto la succión total como la succión matricial, y con ello calcular también la succión osmótica.

La curva de retención se construye considerando tanto el proceso de secado como el de humedecimiento, con el propósito de analizar el comportamiento del suelo dispersivo frente al fenómeno de histéresis. Los datos obtenidos se utilizan para ajustar la curva teórica de retención en el marco del modelo de sólido poroso, lo que permite estimar la distribución teórica del tamaño de poro del suelo.

4.4.1 Medición de succión con método de papel filtro

El método del papel filtro es una técnica indirecta utilizada para determinar la succión del suelo, tanto en su componente matricio como total.

Este procedimiento se basa en el equilibrio higroscópico entre el papel filtro y el suelo, lo cual permite estimar la cantidad de energía con la que el agua está retenida en los poros del suelo.

Existen dos modalidades del método:

- Contacto directo, que permite medir la succión mátrica, colocando el papel filtro en contacto directo con el suelo.
- Sin contacto (ambiente cerrado), que mide la succión total, donde el papel filtro se mantiene suspendido sobre el suelo en un recipiente hermético.

El papel filtro empleado fue Whatman núm. 42, para alcanzar el equilibrio (generalmente entre 7 y 10 días), el contenido de humedad del papel se determina por secado en horno, y luego, a partir de curvas de calibración previamente establecidas, se determina el valor de succión correspondiente.



Figura 24 Pesaje de papel filtro para prueba de succión



Figura 25 Obtención de anillos para succión

Para obtener la **línea de humedecimiento** de la curva de retención se siguen los siguientes pasos:

1. Se preparan 11 muestras de suelo compactado, mediante ensaye Proctor estándar y modificada, dentro de anillos metálicos con volumen (V_m) y peso del anillo (W_{anillo}) previamente conocidos.
2. A partir del contenido de humedad (ω) y los parámetros obtenidos en ensayos previos, como la masa húmeda, densidad seca (ρ_d) y peso específico de los sólidos (S_s), se calculan las relaciones gravimétricas y volumétricas de cada muestra, incluyendo su respectivo grado de saturación.
3. En la base de cada anillo se coloca una lámina de papel aluminio previamente pesada, con el fin de facilitar la manipulación de las muestras y evitar pérdida de material.
4. Las muestras se secan completamente en horno a una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
5. Con base en las relaciones gravimétricas y volumétricas, se añade la cantidad exacta de agua para alcanzar el grado de saturación deseado. Posteriormente, se dejan reposar durante 24 horas dentro de una bolsa plástica sellada para asegurar una distribución uniforme de la humedad. Los grados de saturación que se trabajarán serán: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%.
6. Después de las 24 horas de reposo, se realiza el pesado de las muestras para confirmar o ajustar el grado de saturación final antes de iniciar la medición de succión.



Figura 26 Muestras secas para succión



Figura 27 Muestras preparadas para línea de humedecimiento

Para obtener la **línea de secado** de la curva de retención se siguen los siguientes pasos:

1. Se preparan 11 muestras de suelo compactado, mediante ensaye Proctor estándar y modificada, dentro de anillos metálicos con volumen (V_m) y peso del anillo (W_{anillo}) previamente conocidos.
2. A partir del contenido de humedad (ω) y los parámetros obtenidos en ensayos previos, como la masa húmeda, densidad seca (ρ_d) y peso específico de los sólidos (S_s), se calculan las relaciones gravimétricas y volumétricas de cada muestra, incluyendo su respectivo grado de saturación.
3. En la base de cada anillo se coloca una lámina de papel aluminio previamente pesada, con el fin de facilitar la manipulación de las muestras y evitar pérdida de material.

4. Las muestras se saturan completamente en horno a una temperatura constante de 110 ± 5 °C.
5. Con base en las relaciones gravimétricas y volumétricas, se añade la cantidad exacta de agua para alcanzar el grado de saturación deseado. Posteriormente, se dejan reposar durante 24 horas dentro de una bolsa plástica sellada para asegurar una distribución uniforme de la humedad. Los grados de saturación que se trabajarán serán: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100%.
6. Después de las 24 horas de reposo, se realiza el pesado de las muestras para confirmar o ajustar el grado de saturación final antes de iniciar la medición de succión.



Figura 28 Muestras en proceso de humedecimiento para línea de secado

4.5 Prueba de consolidación de suelos

Esta prueba permite evaluar el comportamiento del suelo ante la aplicación de una carga vertical constante a lo largo del tiempo, cuyo objetivo es determinar tasa y magnitud del asentamiento por consolidación; esto debido a la expulsión del agua de los poros del suelo.

Se realizó con muestras saturadas y no saturadas, de muestras compactadas dinámica y estáticamente.

4.5.1. Procedimiento de muestras compactadas dinámicamente

1. Compactar el suelo mediante Proctor estándar y modificada, y desmoldar el suelo compactado.
2. Extraer la muestra de suelo compactado mediante Proctor estándar y modificado, se coloca en una celda de consolidación, entre piedras porosas.
3. Aplicar cargas verticales escalonadas, duplicando carga en cada etapa.

4. Se registran las lecturas hasta que se vuelve constante, a continuación, se aumenta la carga.
5. Al llegar a la carga máxima se procede a la descarga de la muestra y de igual manera registrar las lecturas.

4.5.2. Procedimiento de muestras compactadas estáticamente

1. Compactar el suelo mediante Proctor estándar y modificada, y desmoldar el suelo compactado.
2. Extraer la muestra de suelo compactado mediante Proctor estándar y modificado, se coloca en una celda de consolidación, entre piedras porosas.
3. Aplicar cargas verticales escalonadas, duplicando carga en cada etapa.
4. Se registran las lecturas hasta que se vuelve constante, a continuación, se aumenta la carga.
5. Al llegar a la carga máxima se procede a la descarga de la muestra y de igual manera registrar las lecturas.

Para las muestras saturadas se realizó el mismo procedimiento, sólo se saturó la muestra y después se aplicaron las cargas.

Lo que respecta a graficar las curvas de compresibilidad, se utilizan las siguientes ecuaciones:

- La ecuación principal es:

$$\Delta e = -C \log \frac{\sigma'_{12}}{\sigma'_{11}} \quad (26)$$

Donde:

C es índice de compresibilidad

σ'_{11} y σ'_{12} son los esfuerzos efectivos iniciales y finales.

- Zona elástica:

$$\Delta e = -\kappa \log \frac{\sigma'_{12}}{\sigma'_{11}} \quad (27)$$

Donde:

K es el índice de recompresión

- Zona elastoplástica

Esta zona involucra los esfuerzos mayores a los de preconsolidación

$$\Delta e = -\lambda \log \frac{\sigma'_{12}}{\sigma'_{11}} \quad (28)$$

Donde:

λ es el índice de compresión virgen



Figura 29 Prueba de consolidación a) no saturada, b) saturada

4.6 Colapso por humedecimiento

Se realizaron tres muestras de suelo, compactadas a 1 ton/m², cargadas con 10, 20, 40 y 60 ton/m². Para esta prueba se colocaron las 4 muestras, se cargaron con el respectivo peso en cada muestra, se toma el tiempo y las lecturas de su deformación hasta que se estabiliza, después se satura el suelo y se repite el mismo proceso.

4.7 Modelación

La modelación del comportamiento hidromecánico de la arena arcillosa, se realizó considerando los factores obtenidos mediante las pruebas antes mencionadas, el parámetro χ parte de la curva de humedecimiento y secado.

También se empleó la preconsolidación del suelo para establecer los esfuerzos a los que fue sometido el suelo. Por último, las pruebas de colapso mediante humedecimiento también fueron consideradas en el modelo.

Finalmente, la modelación se realizó basada en la ecuación planteada por Rojas (Rojas, 2022)

$$\Delta e_n = e_D \lambda_e \frac{\Delta \bar{p}}{p'_{0D}} \quad (29)$$

Donde:

e_D y p'_{0D} representan la relación de vacíos y la preconsolidación al final de la descarga, respectivamente

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentarán los resultados experimentales obtenidos en la investigación; así como los cálculos de dichos resultados.

5.1 Caracterización del suelo

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las propiedades índice del suelo.

Tabla 3 Propiedades índice del suelo

Propiedades	Símbolo	Unidad	Valor
Gravas	G	%	0
Arenas	S	%	80.14
Limos	M	%	15.36
Arcillas	C	%	4.5
Límite Líquido (Casagrande)	LL	%	47.2
Límite Líquido (Cono Inglés)	LL	%	47.6
Límite Plástico	LP	%	21
Índice de Plasticidad	PI	%	23.2
Contracción Lineal	LS	%	5.67
Contracción Volumétrica	VS	%	11.42
Contenido de Humedad Natural		%	13.2
Peso Volumetrico	γ_m	gr/cm ³	1.74
Peso Volumétrico Seco	γ_d	gr/cm ³	1.53
Gravedad Especifica	Ss	gr/cm ³	2.62
Clasificación de Suelo	SC		

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material se clasifica como SC (arena arcillosa), debido a que presenta un contenido de arenas predominante (80.14 %)

y un porcentaje de finos del 19.86 %. Los límites de plasticidad indican que los finos son de naturaleza arcillosa, al ubicarse por encima de la línea A en la carta de plasticidad de Casagrande.

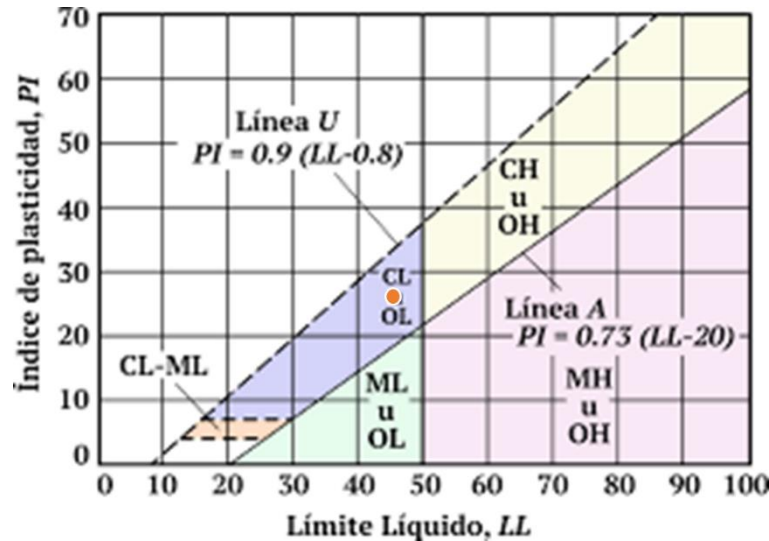


Figura 30 Carta de plasticidad

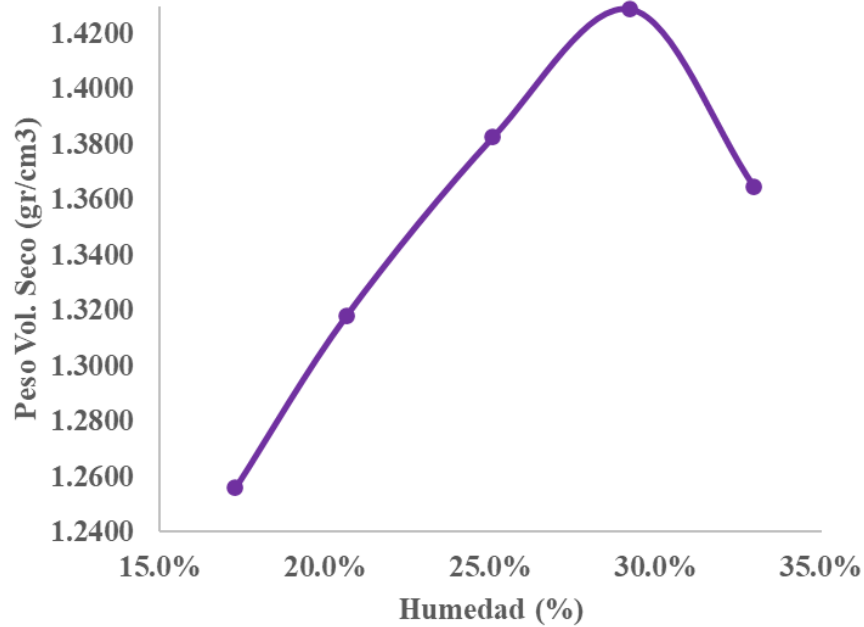
5.2 Compactación Proctor

De acuerdo al peso del pisón, volumen del molde, peso del molde, altura de caída del pisón, numero de golpes y capas que tendrá cada Proctor se determinó la energía de compactación que sería aplicada.

Proctor Estándar			Proctor Modificado		
N	25		N	56	
n	3		n	5	
W	2.47	kg	W	4.53	kg
h	30	cm	h	47	cm
V	936.96	cm ³	V	936.96	cm ³
Ec	5.93	kg/cm ²	Ec	63.63	kg/cm ²

5.2.1 Proctor Estándar

Proctor estándar											
N. compactación	Wm+m (gr)	Wm (gr)	Peso Vol. (gr/cm ³)	flanera	W flanera (gr)	W f+m	Wmh	Wms+f	Wms	W %	Peso Vol. Seco (gr/cm ³)
1	3240	1320	1.4088	G12	125.1	195.3	70.2	187.4	62.3	12.7%	1.2503
2	3300	1380	1.4728	G21	137.1	242.9	105.8	227.3	90.2	17.3%	1.2557
3	3410	1490	1.5902	G15	124.4	234.8	110.4	215.9	91.5	20.7%	1.3180
4	3540	1620	1.7290	G20	125.6	251.3	125.7	226.1	100.5	25.1%	1.3824
5	3650	1730	1.8464	G11	116.9	229.6	112.7	204.1	87.2	29.2%	1.4286
6	3620	1700	1.8144		0		175.4		131.9	33.0%	1.3644



Gráfica 1 Curva de compactación Proctor Estándar

La curva de compactación de la Proctor estándar (Gráfica 1) se obtuvo mediante la preparación de muestras de la misma masa de suelo y distintos porcentajes de humedad, se hizo la compactación de mediante la Proctor estándar, la cual consistía en molde de volumen de 936.96 cm³, un pisón de 2.47 kg, constituido de 3 capas de 25 golpes en cada capa; dando como resultado un peso volumétrico seco de 1.42 gr/cm³ con una humedad de 29.2%.

También se obtuvo la relación de vacíos con la siguientes relaciones gravimétricas y volumétricas:

$$\gamma_d = 1.42 \text{ gr/cm}^3$$

$$W_s = V_T * \gamma_d = 936.96 \text{ cm}^3 * 1.42 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 1333.37 \text{ gr}$$

$$V_s = \frac{W_s}{s_s} = \frac{1333.37 \text{ gr}}{2.62 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 508.92 \text{ cm}^3$$

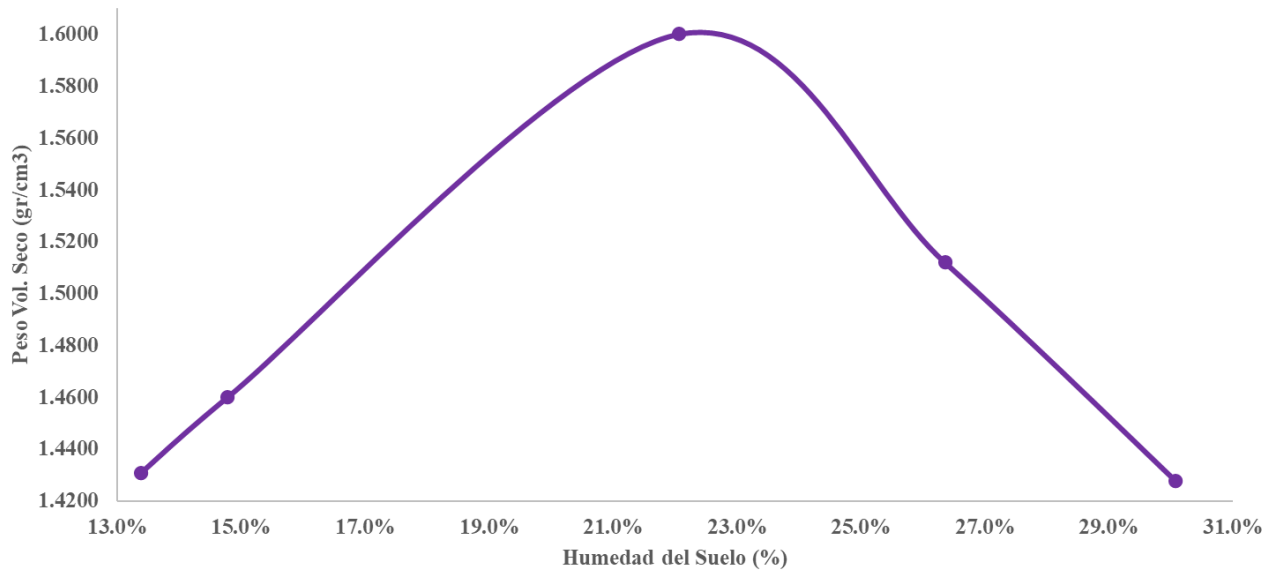
$$V_v = V_T - V_s = 936.96 \text{ cm}^3 - 508.92 \text{ cm}^3 = 428.04 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{428.04 \text{ cm}^3}{508.92 \text{ cm}^3} = 0.841$$

Con esa relación de vacíos se realizarán los cálculos para la compactación estática.

5.2.2 Proctor Modificada

Proctor Modificada											
N. compactación	Wm+m (gr)	Wm (gr)	Peso Vol. (gr/cm3)	flanera	W flanera (gr)	W f+m	Wmh	Wms+f	Wms	W %	Peso Vol. Seco (gr/cm3)
1	3440	1520	1.6223	G11	116.9	199.1	82.2	189.4	72.5	13.4%	1.4308
2	3490	1570	1.6756	G12	125.1	209	83.9	198.2	73.1	14.8%	1.4599
3	3750	1830	1.9531	G13	134.1	235.9	101.8	217.5	83.4	22.1%	1.6001
4	3710	1790	1.9104	G18	118	235	117	210.6	92.6	26.3%	1.5120
5	3660	1740	1.8571	G15	124.4	248.1	123.7	219.5	95.1	30.1%	1.4277



Gráfica 2 Curva de compactación Proctor Modificada

La curva de compactación de la Proctor modificada (**Gráfica 2**) se obtuvo mediante la preparación de muestras de la misma masa de suelo y distintos porcentajes de humedad, se hizo la compactación de mediante la Proctor estándar, la cual consistía en molde de volumen de 936.96 cm³, un pisón de 4.53 kg, constituido de 5 capas de 56 golpes en cada capa; dando como resultado un peso volumétrico seco de 1.6 gr/cm³ con una humedad de 22.1%.

También se obtuvo la relación de vacíos con la siguientes relaciones gravimétricas y volumétricas:

$$\gamma_d = 1.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$W_s = V_T * \gamma_d = 936.96 \text{ cm}^3 * 1.60 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = 1499.23 \text{ gr}$$

$$V_s = \frac{W_s}{s_s} = \frac{1499.23 \text{ gr}}{2.62 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} = 572.23 \text{ cm}^3$$

$$V_v = V_T - V_s = 936.96 \text{ cm}^3 - 572.23 \text{ cm}^3 = 364.74 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{364.74 \text{ cm}^3}{572.23 \text{ cm}^3} = 0.64$$

Con esa relación de vacíos se realizarán los cálculos para la compactación estática.

5.3 Compactación estática

La compactación estática, a diferencia de la dinámica (Proctor), se caracteriza por aplicar cargas lentas y sostenidas, lo que permite una mejor acomodación de las partículas del suelo sin inducir tanta energía de impacto.

Las curvas correspondientes a la **compactación estática en condición no saturada** muestran un comportamiento marcadamente rígido. En las gráficas observamos una pendiente muy baja en la relación e - $\log(\sigma)$, indicando que el índice de vacíos permanece prácticamente constante incluso con aumentos importantes en el esfuerzo vertical aplicado.

Este fenómeno se explica por la presencia de fuerzas de succión en el suelo no saturado, las cuales generan tensiones capilares entre las partículas. Estas fuerzas estabilizan la estructura del suelo, dándole una resistencia aparente adicional que reduce su compresibilidad inicial.

En contraste, las muestras compactadas estáticamente y luego saturadas muestran una notable pérdida de rigidez al incrementar el esfuerzo. En las gráficas se evidencian curvas con mayor pendiente, lo que indica un colapso estructural progresivo del suelo debido a la eliminación de las fuerzas de succión al entrar el agua. La estructura inicialmente rígida pierde cohesión, y las partículas comienzan a reacomodarse más libremente bajo la carga, lo que incrementa la compresibilidad.

Para la realización de las muestras inalteradas implementé relaciones volumétricas y gravimétricas para que tuvieran la misma densidad y relación de vacíos respecto a la que se obtuvo en el ensaye Proctor, con las siguientes ecuaciones:

$$Ws = \gamma_d * Vm$$

$$Ws = 1.43 \text{ gr/cm}^3 * 86.15 \text{ cm}^3 = 122.59 \text{ gr}$$

$$Ww = W * Ws$$

$$Ww = 0.30 * 122.59 \text{ gr} = 36.77 \text{ gr}$$

$$Vs = \frac{Ws}{Ss * \gamma_w}$$

$$Vs = \frac{122.59 \text{ gr}}{2.62 * 1 \text{ gr/cm}^3} = 46.79 \text{ cm}^3$$

$$Vv = Vm - Vs$$

$$Vv = 86.15 \text{ cm}^3 - 46.79 \text{ cm}^3 = 39.36 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$e = \frac{39.36 \text{ cm}^3}{46.79 \text{ cm}^3} = 0.8412$$

5.4 Curva de Retención Agua-Suelo

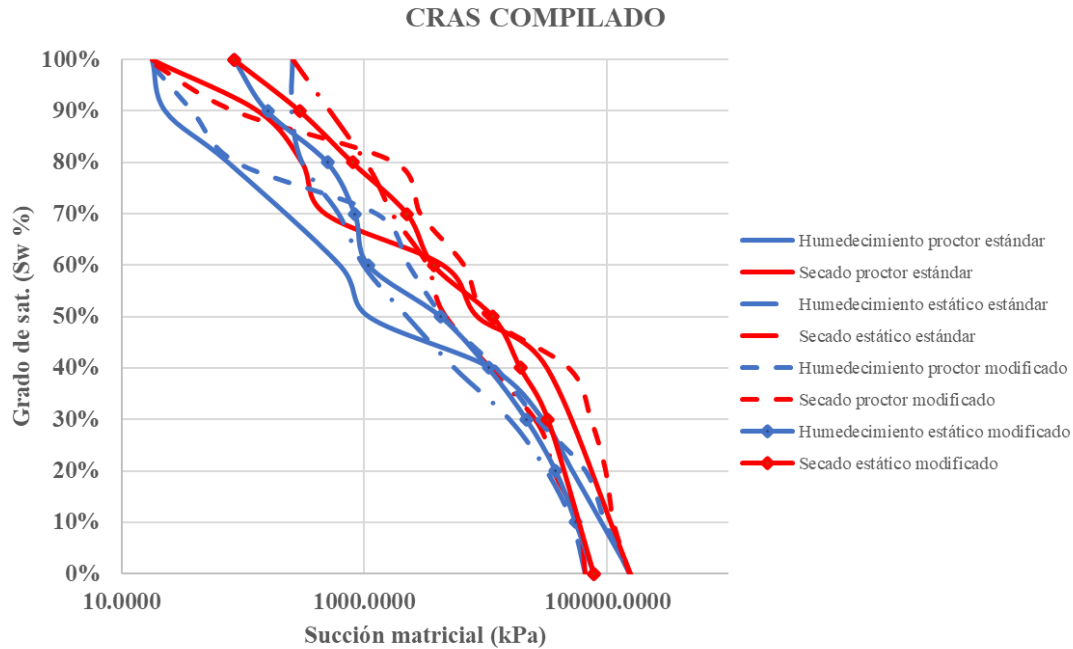
Para la obtención de la succión del suelo, se utilizó el método del papel filtro, con base en la norma ASTM D5298. Para ello, se calibraron dos cajas de papel filtro: una fue empleada en la medición de la succión de las muestras compactadas dinámicamente mediante el método Proctor, y la otra en las muestras compactadas de forma estática.

Los resultados obtenidos muestran que las curvas de succión correspondientes a las muestras compactadas estáticamente presentan un ligero desplazamiento hacia la izquierda respecto a las curvas dinámicas. Este comportamiento puede explicarse por la diferencia en la uniformidad de la estructura interna: la compactación estática tiende a generar una estructura más homogénea y poros de menor tamaño, mientras que la compactación Proctor presenta una distribución más variable, permitiendo la presencia de poros más grandes.

En las curvas de retención agua-suelo (CRAS) se identificaron los siguientes intervalos donde ocurrieron los mayores cambios de succión para cada tipo de ensayo:

- Proctor estándar: entre 50 % y 40 % de saturación, con valores de succión que van de 1000 a 10000 kPa.
- Proctor modificado: entre 80 % y 70 % de saturación, con valores de succión entre 100 y 1000 kPa.
- Compactación estática estándar: entre 50 % y 40 % de saturación, con un rango de succión entre 1100 y 1500 kPa.
- Compactación estática modificada: entre 60 % y 50 % de saturación, con valores de succión que varían de 100 a 400 kPa.

Estos resultados pueden observarse en la **Gráfica 3**, donde se confirma que el método de compactación tiene un efecto directo sobre la variación de la succión en distintos grados de saturación. Particularmente, las muestras compactadas dinámicamente muestran saltos de succión más abruptos, mientras que, en las muestras compactadas de forma estática, los cambios de succión son más progresivos y estables.



Gráfica 3 Compilado de las curvas de retención de cada compactación.

5.5 Pruebas de preconsolidación

La presión de preconsolidación es un parámetro clave en la mecánica de suelos, ya que indica el esfuerzo máximo que el suelo ha soportado en el pasado sin experimentar deformaciones permanentes significativas. Para determinar este valor, se realizaron ensayos de consolidación unidimensional (odométricos) según la norma ASTM D2435.

Las pruebas se llevaron a cabo en muestras compactadas mediante los métodos Proctor y estático, tanto con energía estándar como modificada. A partir de los datos obtenidos, se trazaron las curvas de relación de vacíos (e) frente al logaritmo del esfuerzo efectivo aplicado ($\log \sigma$), y se identificó el punto de cambio de pendiente que indica la presión de preconsolidación, utilizando el método de Casagrande.

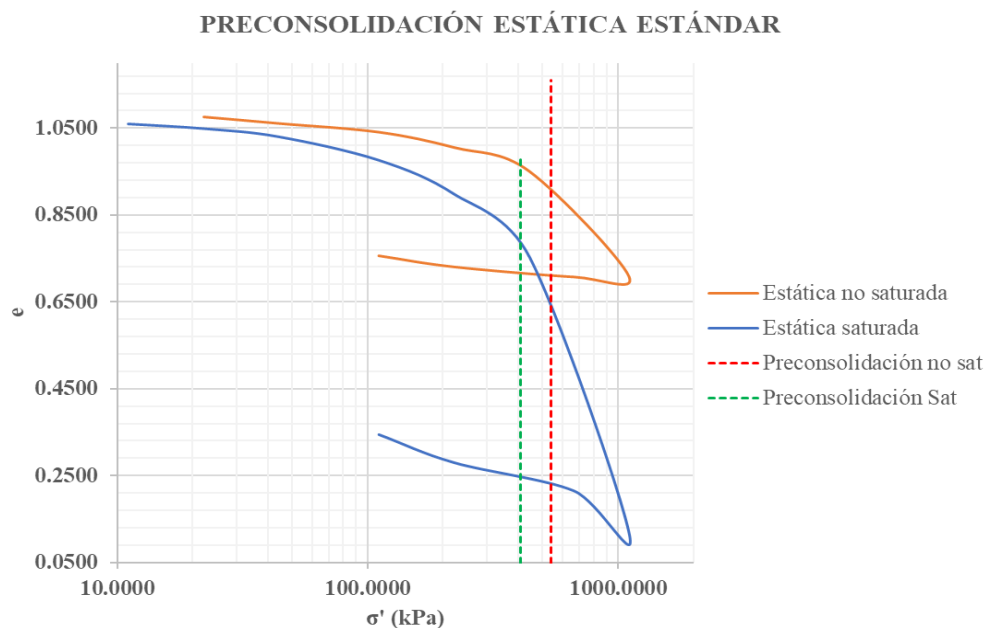
Se realizaron pruebas de consolidación unidimensional en muestras compactadas mediante los métodos Proctor y estático, tanto en estado saturado como no saturado, con energías de compactación estándar y modificada. En la Gráfica de Resumen de Preconsolidaciones se representan las curvas de relación de vacíos (e) contra el logaritmo del esfuerzo (kg/cm^2), lo que permite analizar el comportamiento volumétrico del suelo frente a distintas condiciones de compactación y humedad.

Las curvas muestran que: Las muestras compactadas estáticamente en condición saturada presentan la mayor disminución en la relación de vacíos con el incremento del esfuerzo. Esto sugiere una estructura más estable y densa, susceptible a una mayor compresión inicial debido a la uniformidad del método de compactación.

- Las curvas correspondientes a las muestras compactadas por el método Proctor (tanto estándar como modificado) exhiben un comportamiento más disperso, especialmente en estado no saturado. Esto puede atribuirse a la naturaleza menos homogénea del proceso dinámico de compactación, generando una estructura con mayor variabilidad de poros.
- Las muestras no saturadas, en general, presentan menor compresibilidad, lo cual se evidencia en las pendientes más suaves de las curvas. Esto se debe a la presencia de aire atrapado en los poros, que actúa como soporte temporal frente a las cargas aplicadas.
- Las curvas de las muestras modificadas (tanto Proctor como estática) tienden a mostrar menores relaciones de vacíos iniciales, indicando una mayor densificación del suelo desde el inicio de la prueba, producto de la mayor energía de compactación aplicada.

En conjunto, la Gráfica 5 ilustra cómo el método de compactación, el estado de saturación y el nivel de energía aplicada influyen significativamente en el comportamiento mecánico del suelo, evidenciado en su resistencia a la consolidación y deformación volumétrica.

Las curvas de compresibilidad más representativas son las de compactación estática estándar, obteniendo una preconsolidación no saturada de 540 kPa y saturada de 410 kPa; debido a que la muestra saturada es la que llegó a la máxima deformación, el las otras no se alcanzó al 100 % debido a la capacidad del odómetro.

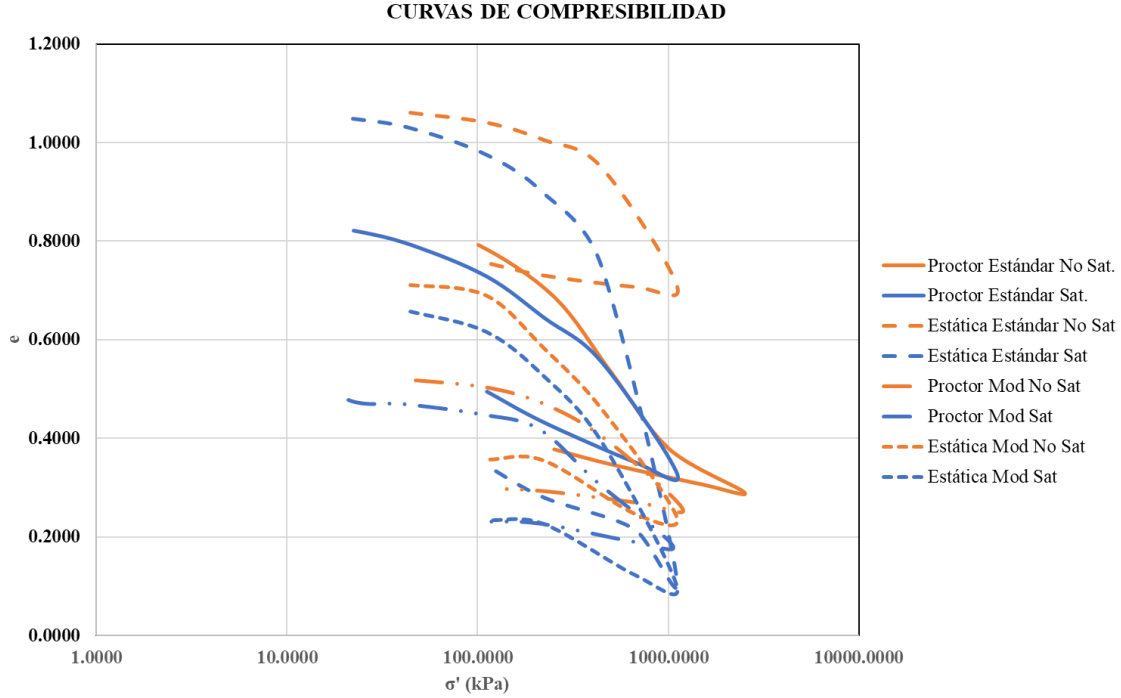


Gráfica 4 Curvas de compresibilidad de compactación estática estándar

En la siguiente tabla se muestran las energías de compactación de las distintas muestras para el ensaye de compresibilidad y su porcentaje de similitud de preconsolidación entre compactación dinámica y estática.

Tabla 4 Tabla resumen de curvas de compresibilidad

Método		Energía de compactación	Preconsolidación (kPa)	% similitud
Proctor	Estándar No	5.93 kg/cm2	950	56.84
Estática	Saturada	8.98 kg/cm2	540	
Proctor	Estándar	5.93 kg/cm2	250	60.98
Estática	Saturada	8.98 kg/cm2	410	
Proctor	Modificada	63.63 kg/cm2	313	65.89
Estática	No Saturada	75.75 kg/cm2	475	
Proctor	Modificada	63.63 kg/cm2	195	82.98
Estática	Saturada	75.75 kg/cm2	235	



Gráfica 5 Compilado de compresibilidades

5.6 Modelación

Se hizo la modelación de cada una de las curvas de compresibilidad realizadas y el colapso del suelo empleado, se usaron las siguientes ecuaciones:

$$\frac{de}{e} = \lambda_e \frac{dp'}{p'} \quad (30)$$

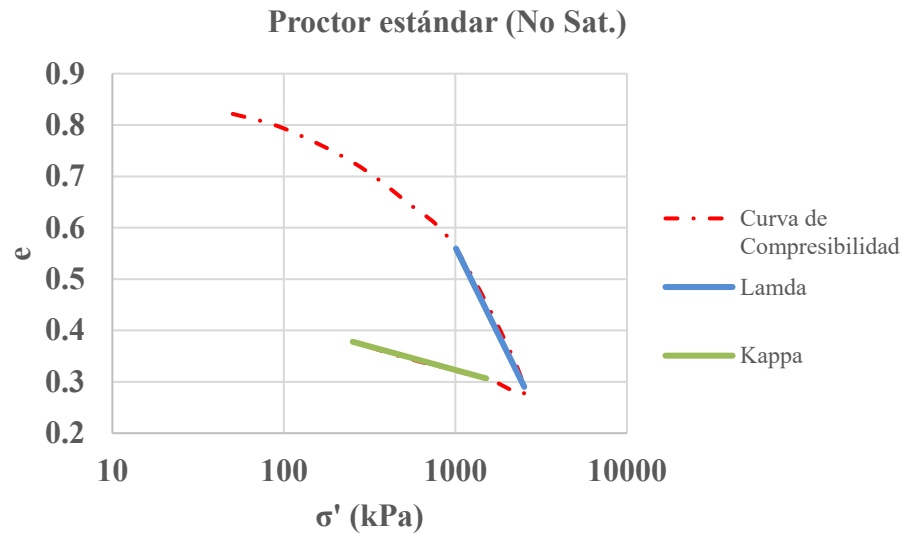
$$\sigma' = p' + \chi s \quad (31)$$

$$\Delta e_n = e_0 \lambda_e \frac{\Delta \bar{p}}{p'_0} \quad (32)$$

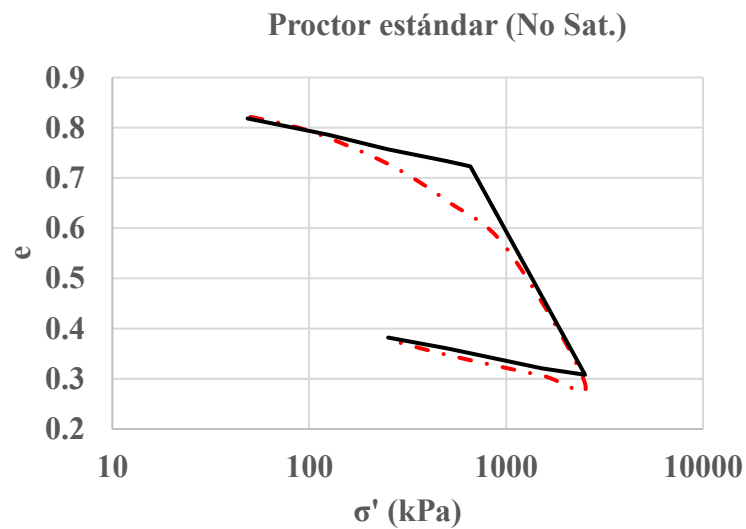
Con los siguientes valores de $\kappa = -0.06168331$ y $\lambda = -0.77666422$, empezando con un grado de saturación $S_w = 93.45\%$ para la Proctor Estándar y compactación estática estándar no saturada, y para la Proctor Modificada y compactación estática modificada con un grado de saturación inicial de $S_w = 82.82\%$. En lo que respecta a las muestras saturadas, es una muestra inundada y se le aplican las mismas cargas.

Para obtener los valores de κ y λ se tomó la gráfica de curvas de consolidación de la Proctor estándar no saturada, estos valores son los que mejor se adaptan para todas las simulaciones, λ se

obtuvo de la pendiente del tramo elastoplástico y el valor de κ del tramo elástico de la curva de compresibilidad.

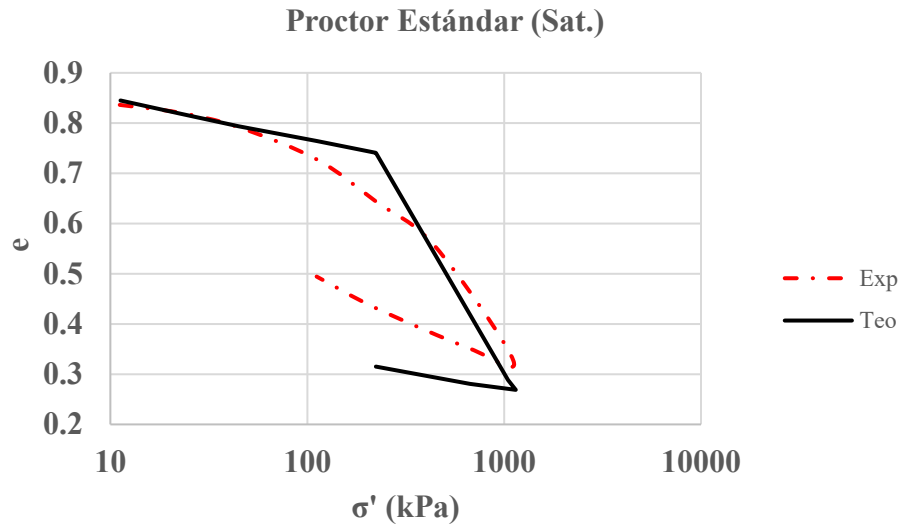


Empezando por la modelación de la Proctor estándar no saturada, obteniendo una correlación de la parte teórica con la experimental de **97.28%**



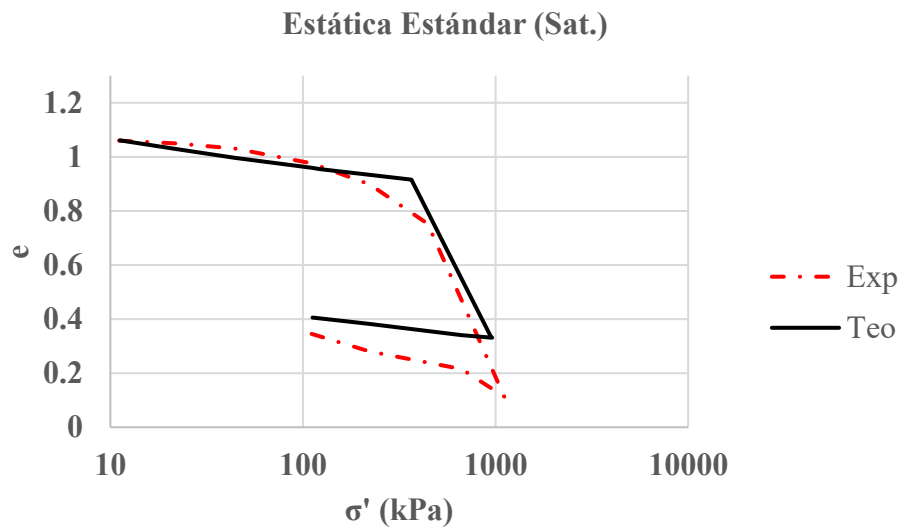
Gráfica 6 Comparación teórica – experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Estándar (No Saturada)

En la Proctor estándar saturada se obtuvo una correlación del **94.60%**



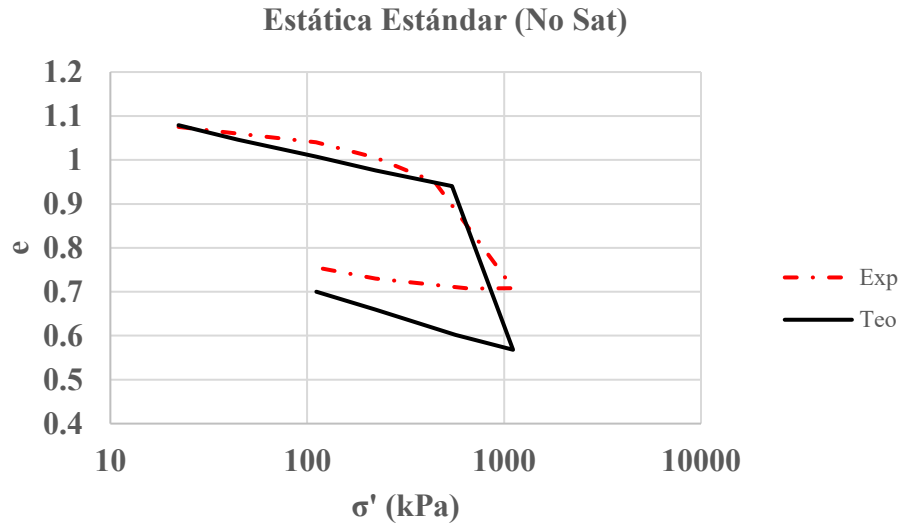
Gráfica 7 Comparación teórica - experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Estándar (Saturada)

Continuando con la compactación estática, igualando la relación de vacíos de la Proctor estándar saturada, se obtiene una correlación de **90.98%**



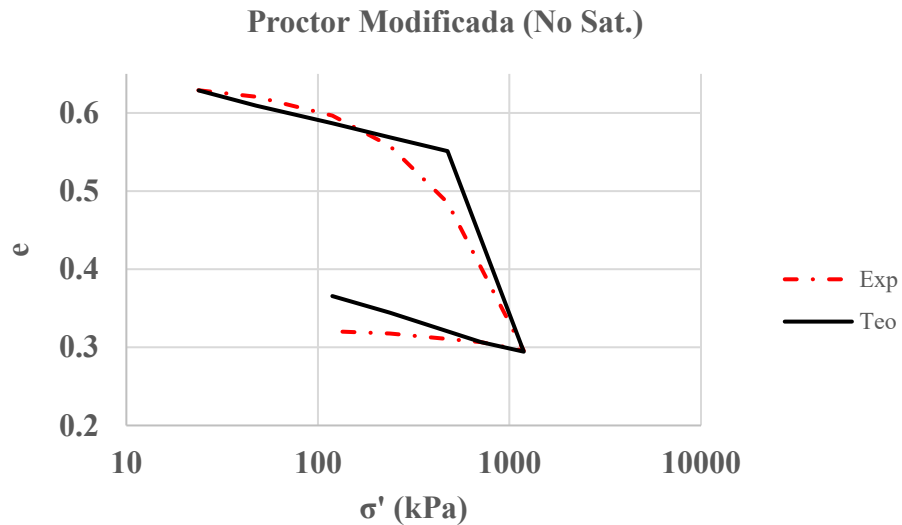
Gráfica 8 Comparación teórico – experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática estándar (Saturada)

Se hizo el mismo procedimiento en la muestra anterior y se obtuvo una correlación de **99.15%**



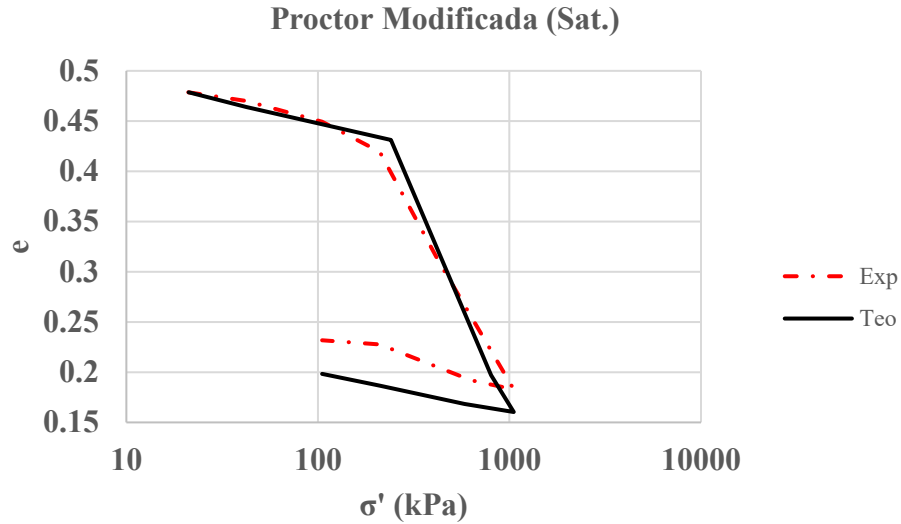
Gráfica 9 Comparación teórico – experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática estándar (No Saturada)

En lo que respecta a la Proctor modificada no saturada, la modelación tiene una correlación de **98.15%**



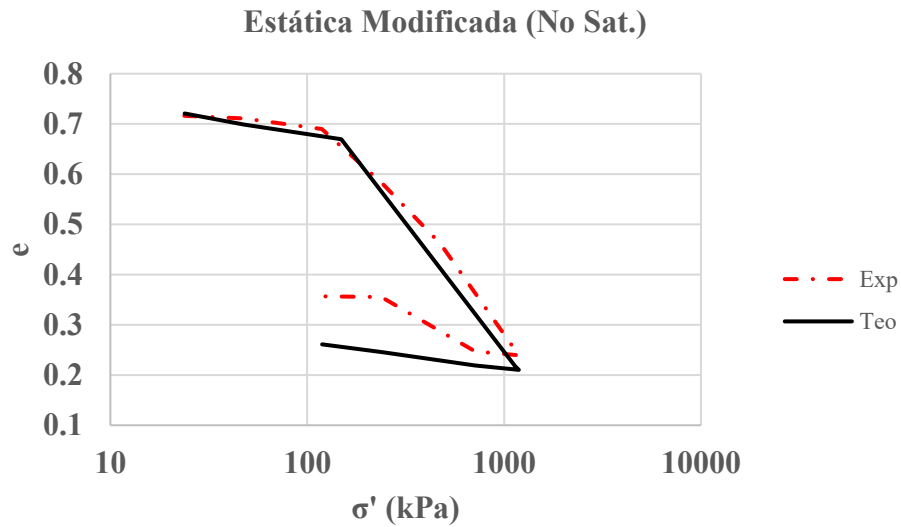
Gráfica 10 Comparación teórico - experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Modificada (No Saturada)

Y, por último, la correlación entre la modelación y lo experimental de la Proctor modificada saturada es de **97.17%**



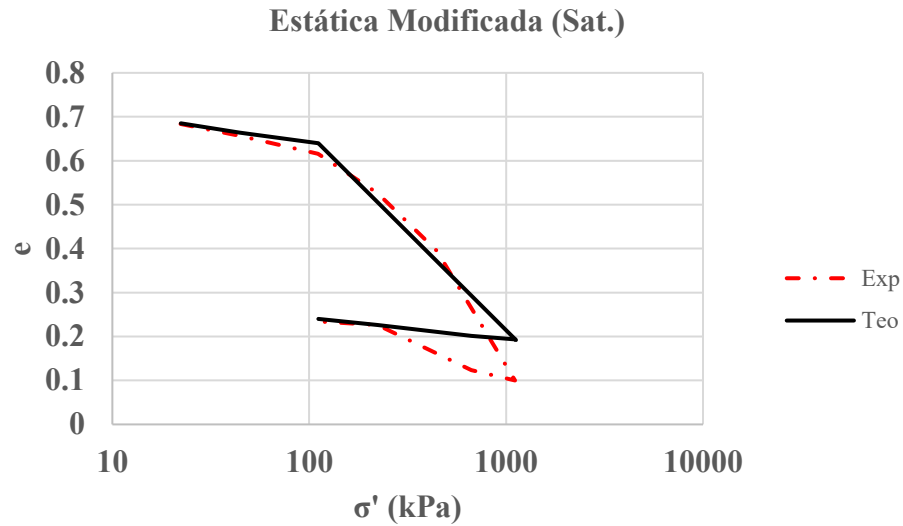
Gráfica 11 Comparación teórico - experimental de curvas de compresibilidad de Proctor Modificada (Saturada)

Igualando la relación de vacíos de la Proctor modificada, con una compactación estática se obtuvo la siguiente modelación:



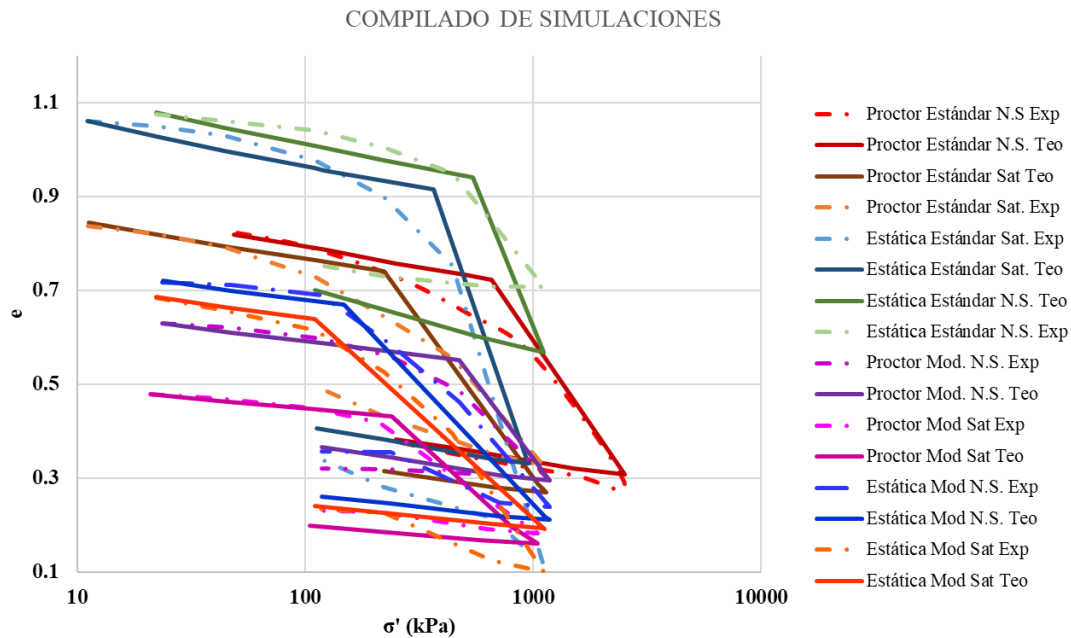
Gráfica 12 Comparación de teórico - experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática modificada (No Saturada).

Con la modelación teórica con respecto a los resultados experimentales se obtuvo una correlación del **84.37%** y por último la modelación de la estática modificada saturada tuvo una correlación de **82.39%**.



Gráfica 13 Comparación teórica - experimental de curvas de compresibilidad de compactación estática modificada (Saturada)

En la siguiente gráfica se encuentra compilado la simulación teórica con los resultados experimentales obtenidos en el proceso de esta investigación y una tabla comparativa de la similitud teórica con la experimental.



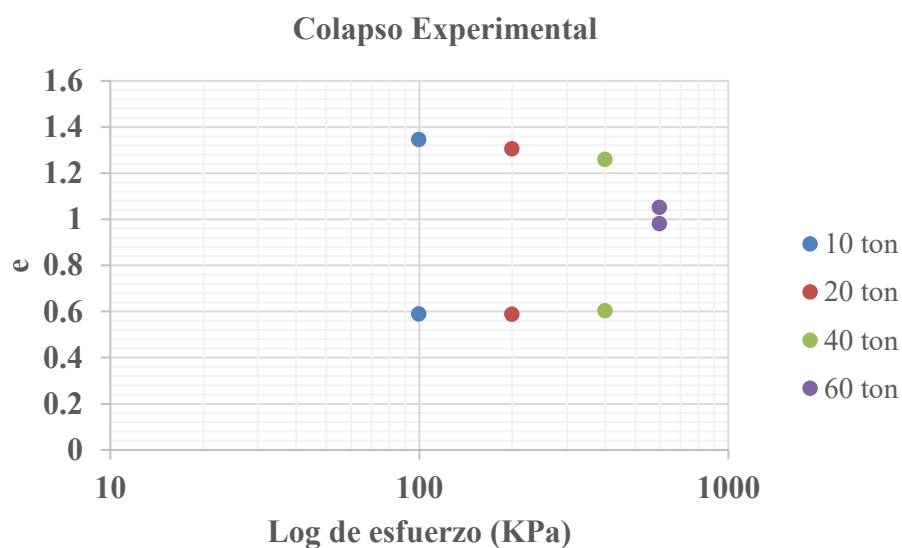
Gráfica 14 Compilado de simulaciones del modelo elastoplástico

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

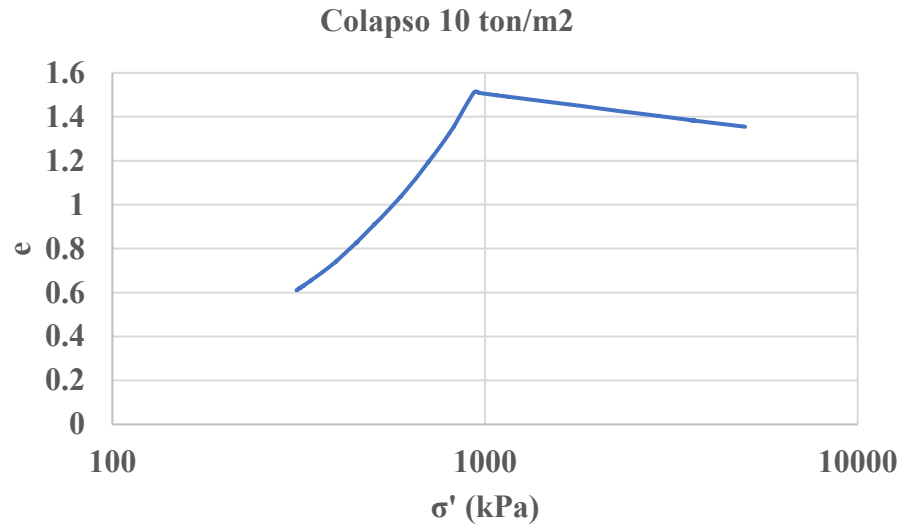
Tabla 5 Porcentaje de similitud teórica - experimental

Método		% similitud	Método		% similitud
Experimental	Proctor Estándar	97.28	Experimental	Proctor Modificada	98.51
Teórica	No Saturada		Teórica	No Saturada	
Experimental	Proctor Estándar	94.60	Experimental	Proctor Modificada	97.17
Teórica	Saturada		Teórica	Saturada	
Experimental	Estática Estándar	90.98	Experimental	Estática Modificada	84.37
Teórica	Saturada		Teórica	No Saturada	
Experimental	Estática Estándar	99.15	Experimental	Estática Modificada	82.40
Teórica	No Saturada		Teórica	Saturada	

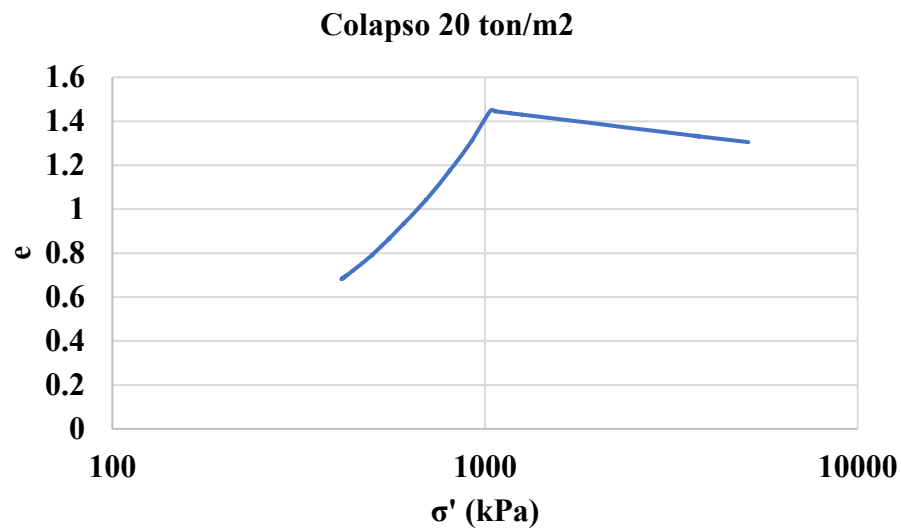
El colapso de la muestra se realizó con una muestra con una humedad de 16%, compactada estáticamente con 1 ton/m² y se colapsó con una carga de 10, 20, 40 y 60 ton/m².



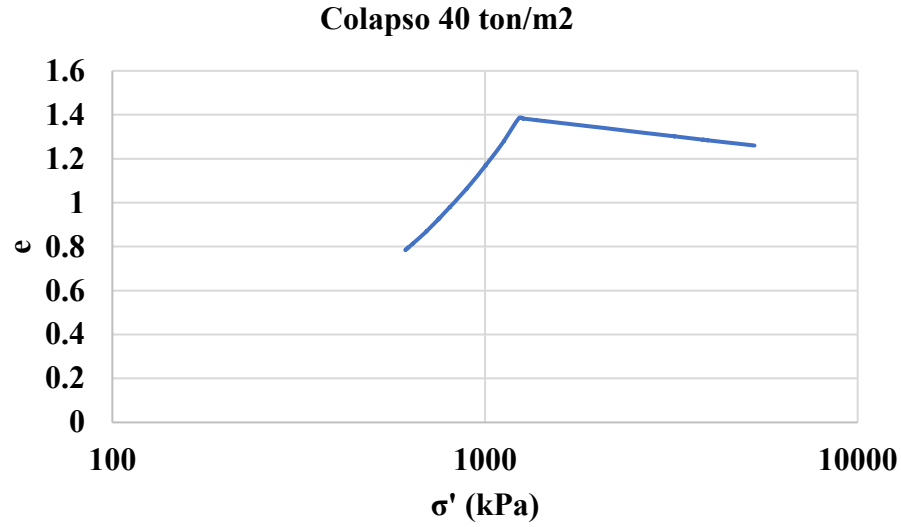
Gráfica 15 Colapso del suelo sometido a distintas cargas



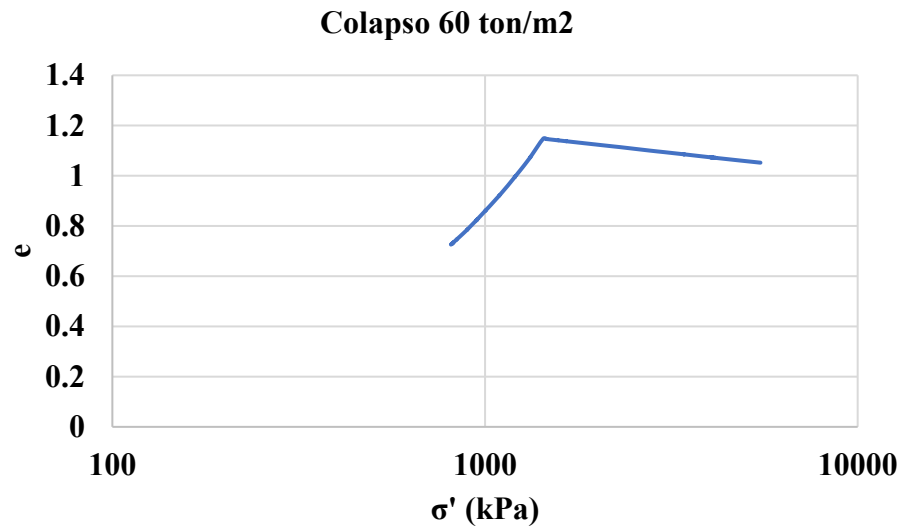
Gráfica 16 Modelación de colapso con 10 ton/m²



Gráfica 17 Modelación de Colapso con 20 ton/m²

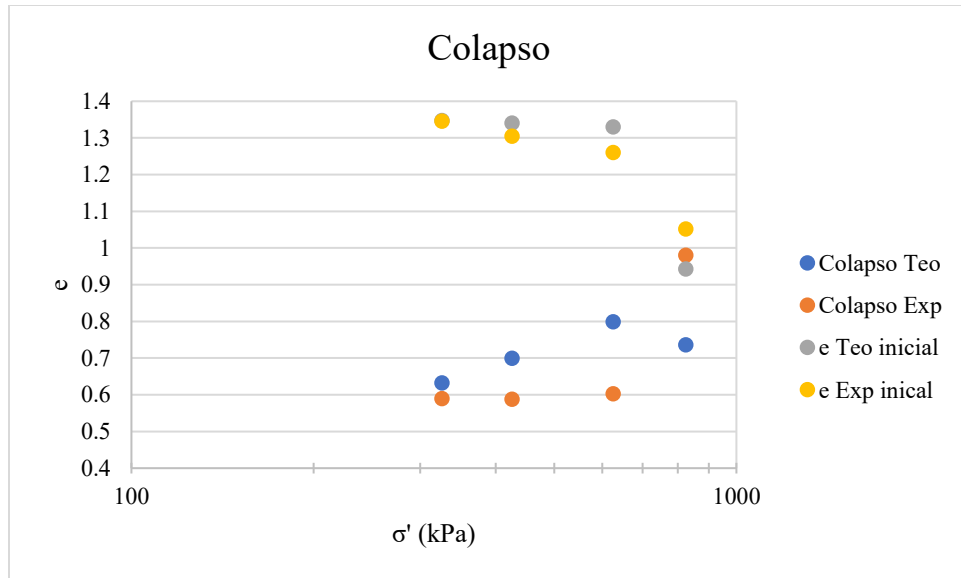


Gráfica 18 Modelación de colapso con 40 ton/m²



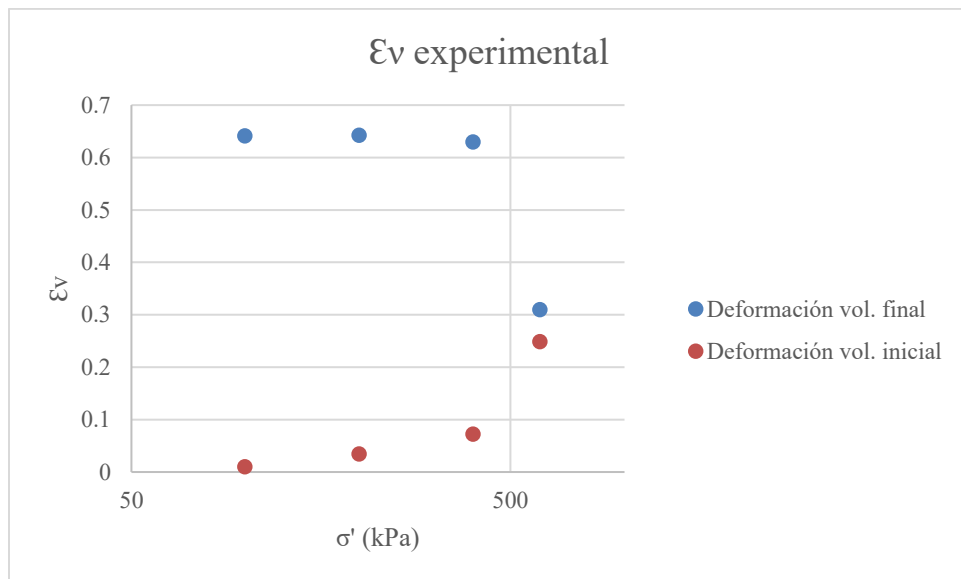
Gráfica 19 Modelación de colapso con 60 ton/m²

En lo que respecta a las pruebas de colapso, la modelación se hizo el modelo con el valor de κ debido a que la carga es menor que la de preconsolidación y después la predicción se hace con λ porque se superó el esfuerzo de preconsolidación.



Gráfica 20 Colapso teórico y experimental

Se realizó la modelación de la deformación volumétrica teórica con la Ecuación 18, donde la e teórica parte de la modelación anterior.



Gráfica 21 Deformación volumétrica experimental del suelo por colapso

VI. CONCLUSIONES

La comparación entre los resultados experimentales y teóricos muestra un alto grado de similitud, lo que valida la aplicación del modelo elastoplástico basado en esfuerzos efectivos de Bishop para suelos compactados. En condiciones no saturadas, las similitudes alcanzaron valores de hasta 99.15 % para Proctor Estándar y 98.51 % para Proctor Modificada, mientras que en condiciones saturadas se obtuvieron similitudes superiores al 94 % en la mayoría de los casos, confirmando la adecuada representación del comportamiento volumétrico del suelo.

En términos de esfuerzos normales de compresión vertical efectiva, la compactación dinámica Proctor Estándar, con una energía de 5.93 kg/cm², presentó presiones de preconsolidación de 950 kPa y 250 kPa, mientras que la compactación estática equivalente, con esfuerzos de 8.98 kg/cm², mostró valores de preconsolidación de 540 kPa y 410 kPa, alcanzando similitudes del 56.84 % y 60.98 %, respectivamente. Estas diferencias reflejan el efecto del método de aplicación de la energía en la estructura del suelo.

Para la compactación Proctor Modificada, la energía dinámica aplicada fue de 63.63 kg/cm², mientras que la compactación estática equivalente se realizó con un esfuerzo de compresión vertical de 75.75 kg/cm². Bajo estas condiciones, las presiones de preconsolidación obtenidas variaron entre 313 kPa y 195 kPa para Proctor Modificada, y entre 475 kPa y 235 kPa para la compactación estática, alcanzándose similitudes de hasta 82.98 %, lo que indica una mayor coherencia entre ambos métodos cuando se emplean mayores niveles de energía.

Los resultados confirman que el comportamiento elástico del suelo, asociado a esfuerzos efectivos inferiores a la presión de preconsolidación, es gobernado por el parámetro κ (kappa), mientras que al superar dicha presión el suelo entra en la zona plástica, controlada por el parámetro λ (lambda). Estos parámetros permitieron describir adecuadamente las pendientes observadas en las curvas de compresibilidad $e-\log \sigma'$, tanto en estado saturado como no saturado; de igual manera estos parámetros se emplean para el modelo matemático, pero indicando un valor único para cada parámetro y ese es el que adapta a el modelo a todas las simulaciones.

En relación con el colapso por humedecimiento, se observó que al aplicar esfuerzos efectivos de compresión vertical cercanos a 60 ton/m², el suelo presentó un colapso inicial significativo asociado a la reducción de la succión. No obstante, una vez que el material alcanzó un estado cercano a la saturación total, el colapso adicional fue mínimo ($I_c=3.5\%$), con deformaciones

volumétricas reducidas, lo que indica que la mayor parte del reacomodo estructural ocurre durante las primeras etapas del proceso de inundación.

Finalmente, la comparación entre métodos de compactación demuestra que, aunque la compactación estática requiere la aplicación de mayores esfuerzos de compresión vertical para reproducir condiciones equivalentes a la compactación dinámica, ambos métodos pueden generar densidades comparables cuando se iguala la energía efectiva aplicada. Esto resalta la importancia de considerar explícitamente el tipo de esfuerzo, la energía de compactación, la succión y los parámetros elastoplásticos en el análisis y diseño de obras geotécnicas apoyadas sobre suelos compactados.

VI. REFERENCIAS

- Bishop, A. W. (1959). The principal of effective stress. *Teknisk Ukeblad*, 39, 859–863.
- Bishop, A. W., & Blight, G. E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique*, 13(3), 177–197.
- de Agreda, E., & Lloret Morancho, A. (1985). Comportamiento de suelos parcialmente saturados. *Revista de Obras Públicas*, 132(3280), 435–461.
- de Santos, C. (2019). *Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas*.
- Desai, C. S. (2005). Constitutive modeling for geologic materials: Significance and directions. *International Journal of Geomechanics*, 5(2), 81–84.
- Dineen, K. (1997). *The influence of soil suction on compressibility and swelling*. University of London.
- Fredlund, D. G. (2000). The 1999 RM Hardy Lecture: The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 963–986.
- Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(5), 447–466.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 521–532.
- Gens, A., & Potts, D. M. (1988). Modelos elasto-plásticos de estado crítico para análisis numéricos de problemas geotécnicos. I-Formulación básica y principales modificaciones. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 497–522.
- INEGI. (2022). Instituto Nacional de Estadística y geografía (INEGI). In *Censo de población y vivienda 2020* (p. 2022).
- Juárez E. (2009). *Juárez E* (p. 692).
- Lee, H. C., & Wray, W. K. (1995). *Techniques to evaluate soil suction-a vital unsaturated soil water variable*.
- Meza Ochoa, V. E. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31, 23–38.
- Reginatto, A. (1970). Predicción de la susceptibilidad al colapso. *Segunda Reunión Argentina de*

- Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Córdoba, Argentina*, 96, 161–190.
- Ridley, A. M. (1993). *The measurement of soil moisture suction*. Imperial College London (University of London).
- Rojas, E. (2022). Unified elastoplastic framework for the volumetric behavior of unsaturated soils during drained, undrained, and static compaction tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(8), 1459–1473.
- Rojas, E., Zepeda, A., Pérez-Rea, M. L., Leal, J., & Gallegos, G. (2011). A four elements porous model to estimate the strength of unsaturated soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29, 193–202.
- Seed, H. B., & Chan, C. K. (1959). Structure and strength characteristics of compacted clays. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(5), 87–128.
- SEMARNAT. (2008). SEMARNAT. *Capítulo 3: Suelos*.
- Tauta, J. F. C., Ortiz, O. J. R., & González, D. F. M. (2007). Ensayo de compactación giratoria en suelos como alternativa al ensayo de compactación proctor. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17(2), 67–81.
- Ulloa Cortés, J. C. (2007). *Fabricación de suelos expansivos y colapsables*.
- Uriel, S., & Serrano, A. (1974). Propiedades geotécnicas de dos suelos volcánicos colapsibles de baja densidad en la cimentación de dos presas en las Islas Canarias (España). *Boletín de Información Laboratorio Del Transporte y Mecánica Del Suelo*, 105, 21–28.
- Zur, A., & Wiseman, G. (1975). A study of collapse phenomena of an undisturbed loess. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 12(4), 54–55.

VII. ANEXOS

7.1. Peso volumétrico del suelo

Tabla 4 Testigos de humedad natural

TESTIGOS DE HUMEDAD				
Wm+f	Wf	Wms+f	Wms	ω
168.45	123.33	163.12	39.79	13.40
171.03	125.64	165.78	40.14	13.08
165.89	120.86	160.67	39.81	13.11
Promedio				13.20

$$V_p = \frac{W_p}{\rho_p} \quad (33)$$

$$V_{mp} = \frac{(W_{mp} - W'_{mp})}{\gamma_w} \quad (34)$$

$$V_m = V_{mp} - V_p \quad (35)$$

$$\gamma_m = \frac{W_m}{V_m} \quad (36)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega} \quad (37)$$

Donde:

V_{mp} : Volumen de muestra cubierta con parafina

V_p : Volumen de parafina

ρ_p : Densidad de la parafina

W_{mp} : Peso de la muestra cubierta con parafina

W'_{mp} : Peso de la muestra cubierta con parafina sumergida en agua

W_p : Peso de la parafina

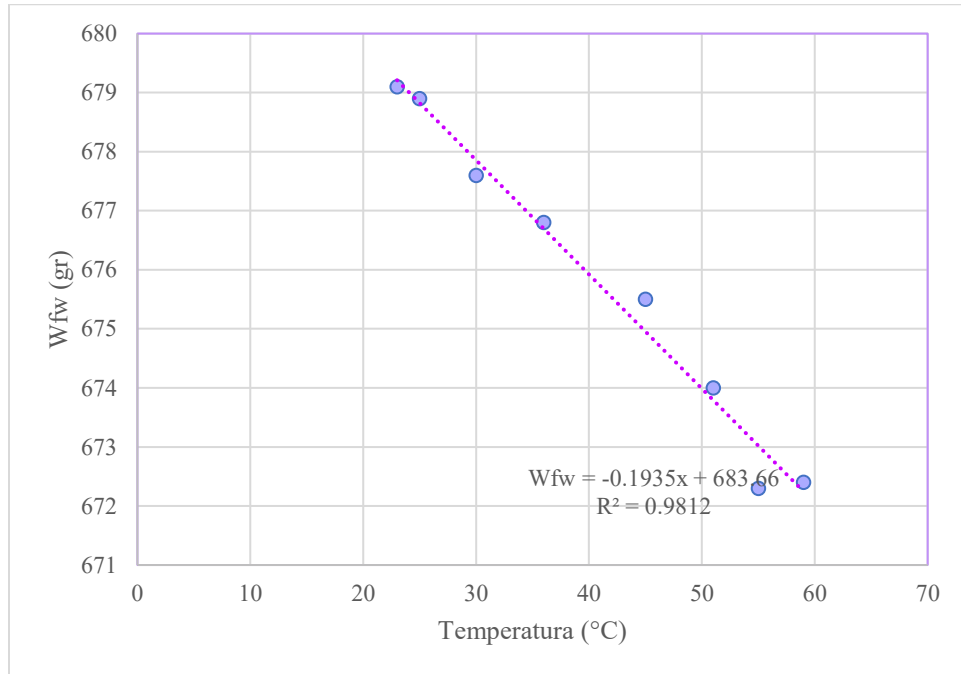
Tabla 6 Peso volumétrico del suelo

Muestra	Wm	Wm+p	Wm+p (agua)	Wp	D. p	V parafina	V total	Vm	γm	γd
1.00	84.85	109.00	32.60	24.15	0.96	25.16	76.40	51.24	1.66	1.46
2.00	83.60	101.60	35.20	18.00	0.96	18.75	66.40	47.65	1.75	1.55
3.00	363.20	430.70	155.10	67.50	0.96	70.31	275.60	205.29	1.77	1.56
4.00	204.30	242.20	83.70	37.90	0.96	39.48	158.50	119.02	1.72	1.52
5.00	369.20	428.70	160.10	59.50	0.96	61.98	268.60	206.62	1.79	1.58
Promedio									1.74	1.53

7.2. Peso específico relativo de sólidos (Ss)

Tabla 7 Calibración de matraz para prueba peso específico relativo Ss

CALIBRACIÓN DE MATRAZ	
TEMPERATURA (°C)	PESO (gr)
59	672.4
55	672.3
51	674
45	675.5
36	676.8
30	677.6
25	678.9
23	679.1
WS (gr)	50
WF (gr)	180.2



Gráfica 22 Curva de calibración de matraz

$$Ss = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fws}} \quad (32)$$

Donde:

W_{fw} : Peso de matraz y agua destilada

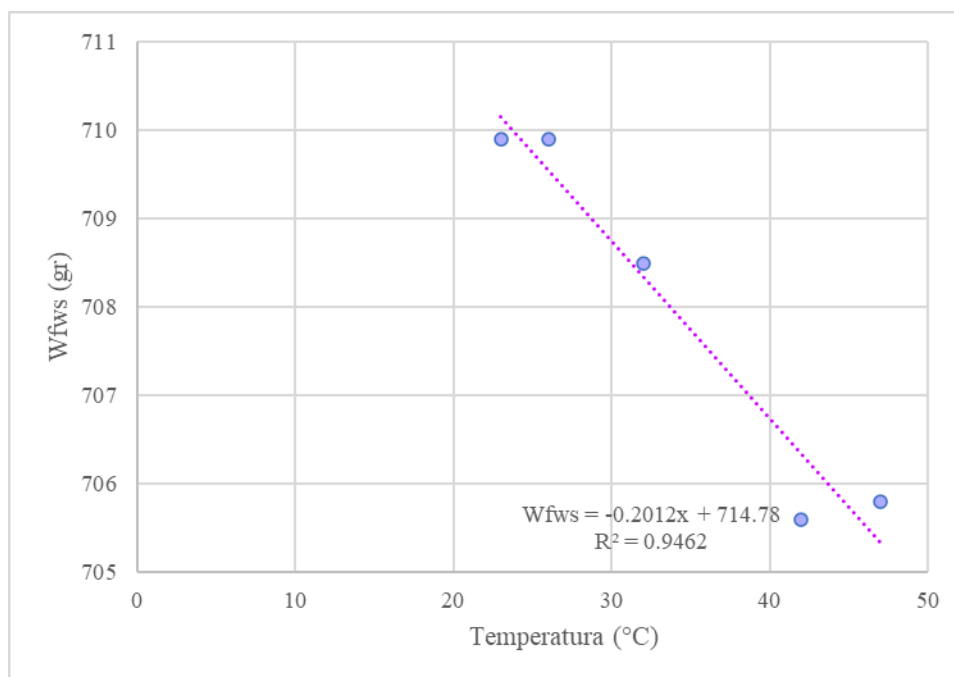
W_s : Peso de sólidos secos

W_{fws} : Peso de matraz, agua destilada y sólidos secos

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 8 Peso relativo de sólidos

MATRAZ+AGUA+SUELO	
TEMPERATURA (°C)	PESO (gr)
47	705.8
42	705.6
32	708.5
26	709.9
23	709.9
Temp. Ambiente	21
Wfw	679.5965
Wfws	710.5548
Ss	2.625815972



Gráfica 23 Peso relativo de sólidos

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

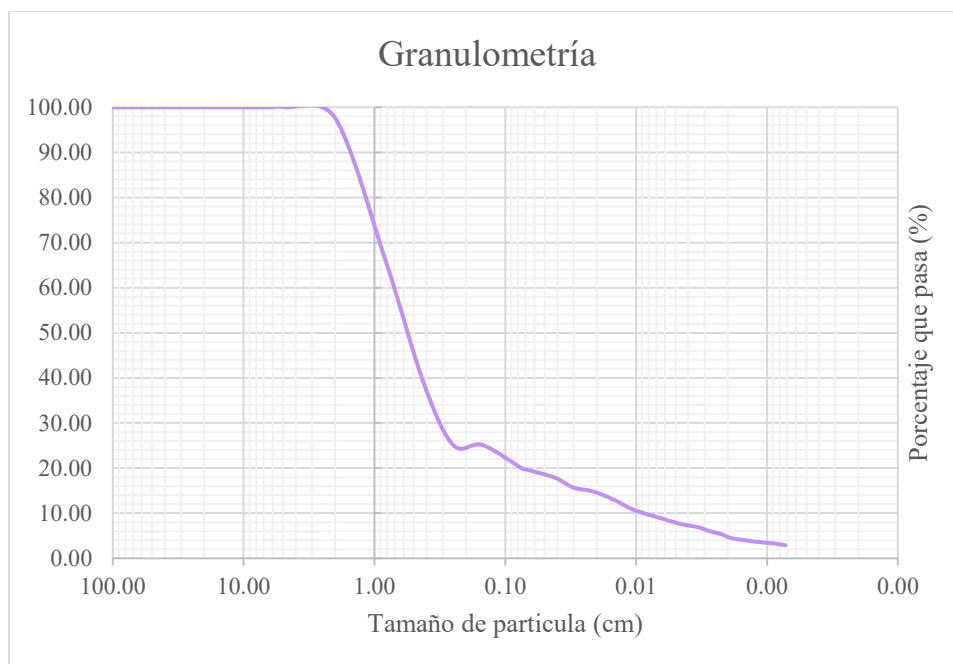
7.3. Análisis granulométrico

Tabla 9 Granulometría con mallas

	Malla	Abertura (mm)	W (gr)	W acum. (gr)	% ret	% pasa
G r a v a s	4"	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	3 1/2"	90.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	2 1/2"	63.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	2"	50.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	1 3/4"	45.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
	1 1/4"	31.50	0.00	0.00	0.00	100.00
	1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	1/2"	12.50	0.00	0.00	0.00	100.00
	3/8"	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
	1/4"	6.30	0.00	0.00	0.00	100.00
A r e n a s	4	4.76	0.00	0.00	0.00	100.00
	10	2.00	16.30	16.30	2.35	97.65
	20	0.81	1099.60	221.70	32.02	65.63
	40	0.42	1063.50	185.60	26.81	38.82
	60	0.25	972.80	94.90	13.71	25.12
	100	0.15	0.00	0.00	0.00	25.12
	200	0.07	914.30	36.40	5.26	19.86

Tabla 10 Prueba de hidrómetro para análisis granulométrico

Tiempo min	T °C	R' _H	R _m	L cm	C _t	R _H	W _D %	L/t cm/min	K	D mm	% Que Pasa
0.25	21.0	54.00	55.00	5.86	0.20	47.20	95.40	23.43	0.01372	0.06639	10.53
0.5	21.0	51.00	52.00	6.32	0.20	44.20	89.34	12.63	0.01372	0.04875	9.86
1	21.0	46.00	47.00	7.08	0.20	39.20	79.23	7.08	0.01372	0.03650	8.75
2	21.0	44.00	45.00	7.39	0.20	37.20	75.19	3.69	0.01372	0.02636	8.30
3	21.0	42.00	43.00	7.69	0.20	35.20	71.15	2.56	0.01372	0.02196	7.85
5	21.0	39.00	40.00	8.15	0.20	32.20	65.08	1.63	0.01372	0.01751	7.19
10	21.0	34.00	35.00	8.92	0.20	27.20	54.98	0.89	0.01372	0.01295	6.07
15	21.0	32.00	33.00	9.22	0.20	25.20	50.93	0.61	0.01372	0.01076	5.62
30	21.0	29.00	30.00	9.68	0.20	22.20	44.87	0.32	0.01372	0.00779	4.95
60	21.0	26.00	27.00	10.14	0.20	19.20	38.81	0.17	0.01372	0.00564	4.28
120	21.0	24.00	25.00	10.45	0.20	17.20	34.76	0.09	0.01372	0.00405	3.84
180	21.0	22.00	23.00	10.75	0.20	15.20	30.72	0.06	0.01372	0.00335	3.39
300	21.0	20.00	21.00	11.06	0.20	13.20	26.68	0.04	0.01372	0.00263	2.95
600	21.0	18.00	19.00	11.37	0.20	11.20	22.64	0.02	0.01372	0.00189	2.50
1440	21.0	16.00	17.00	11.67	0.20	9.20	18.60	0.01	0.01372	0.00123	2.05
2880	21.0	15.00	16.00	11.82	0.20	8.20	16.57	0.00	0.01372	0.00088	1.83
4320	21.0	14.00	15.00	11.98	0.20	7.20	14.55	0.00	0.01372	0.00072	1.61

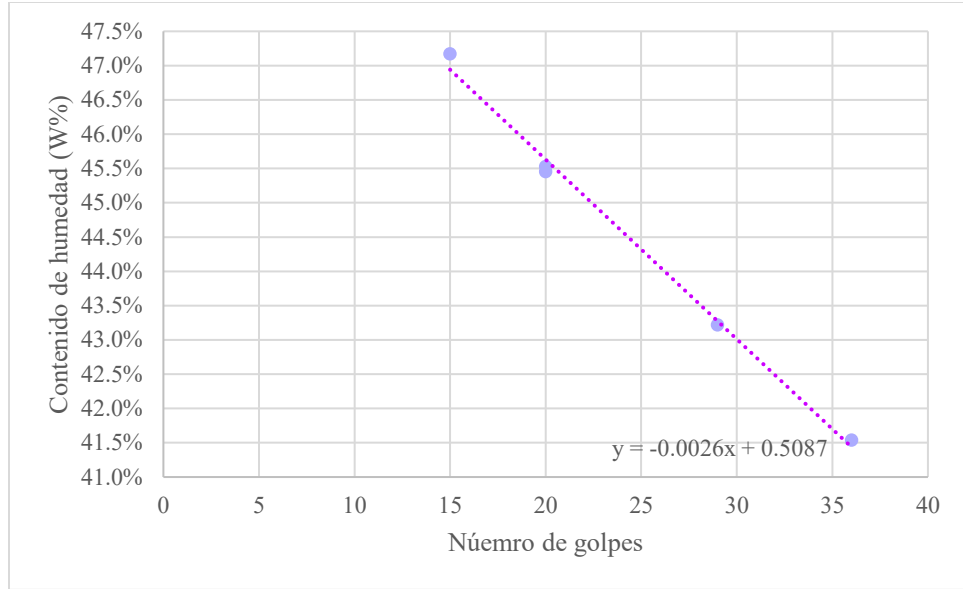


Gráfica 24 Granulometría

7.4. Límites de consistencia

Tabla 11 Límites de consistencia

LÍMITE LÍQUIDO							
Flanera	Wf	Wsh+f	Ws+f	Suelo Hum	Suelo seco	No. Golpes	w%
G12	125.1	143.5	138.1	18.4	13	36	41.5%
G21	137.1	154	148.9	16.9	11.8	29	43.2%
G20	125.6	141.6	136.6	16	11	20	45.5%
G11	116.9	134.8	129.2	17.9	12.3	20	45.5%
G14	125.1	140.7	135.7	15.6	10.6	15	47.2%
LÍMITE PLÁSTICO							
G17	120.8	124.1	123.5	3.3	2.7		22%
G19	119.4	121.2	120.9	1.8	1.5		20%
G13	134.1	138.3	137.6	4.2	3.5		20%



Gráfica 25 Límite Líquido

LL	44%
LP	21%
IP	23.2

7.5. Compresibilidad y preconsolidación de Proctor Estándar

Tabla 12 Compresibilidad de Proctor estándar no saturada

Curva de compresibilidad (Proctor estándar no saturada)					
Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	ε (cm)	H (cm)	e
0	0.0000	0.0000	0.0000	2.5300	0.8410
10	0.5134	50.3466	0.0267	2.5033	0.8216
20	1.0268	100.6931	0.0660	2.4640	0.7929
50	2.5670	251.7329	0.2108	2.3192	0.6876
100	5.1339	503.4657	0.4225	2.1075	0.5335
200	10.2679	1006.9314	0.6342	1.8958	0.3795
500	25.6697	2517.3285	0.7569	1.7731	0.2902
300	15.4018	1510.3971	0.7343	1.7957	0.3067
100	5.1339	503.4657	0.6784	1.8516	0.3473
50	2.5670	251.7329	0.6363	1.8937	0.3780

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

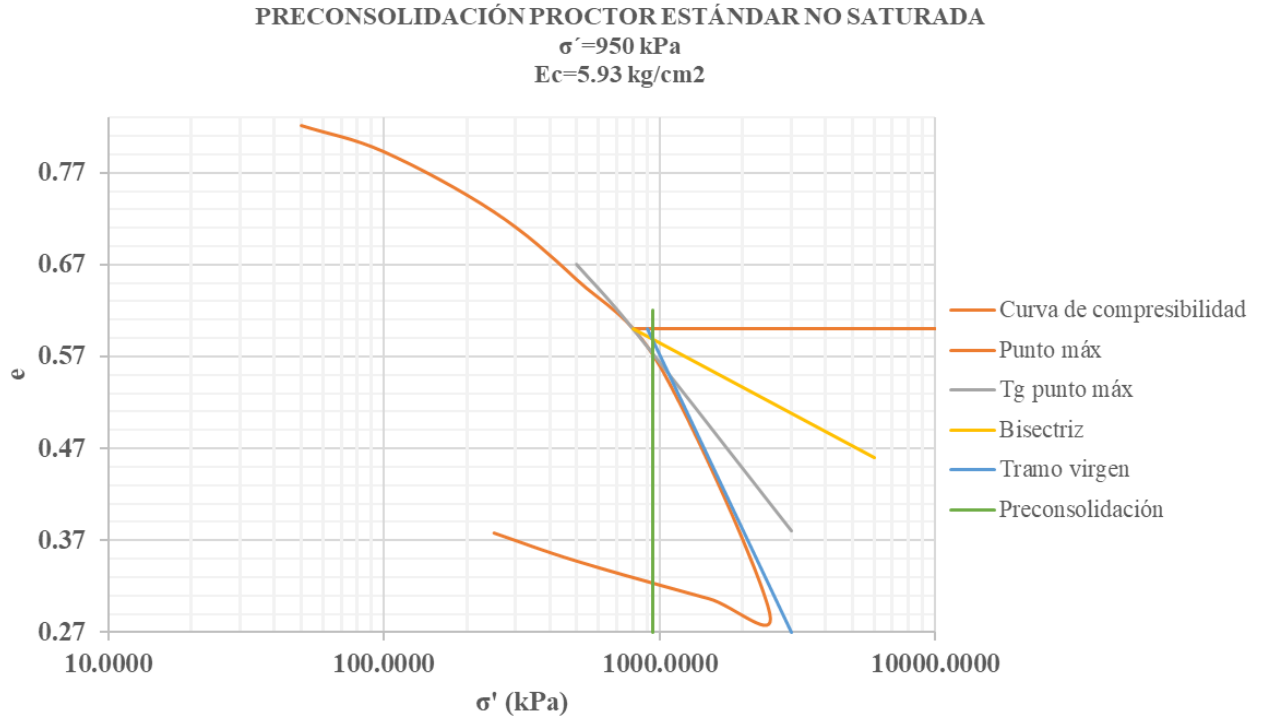
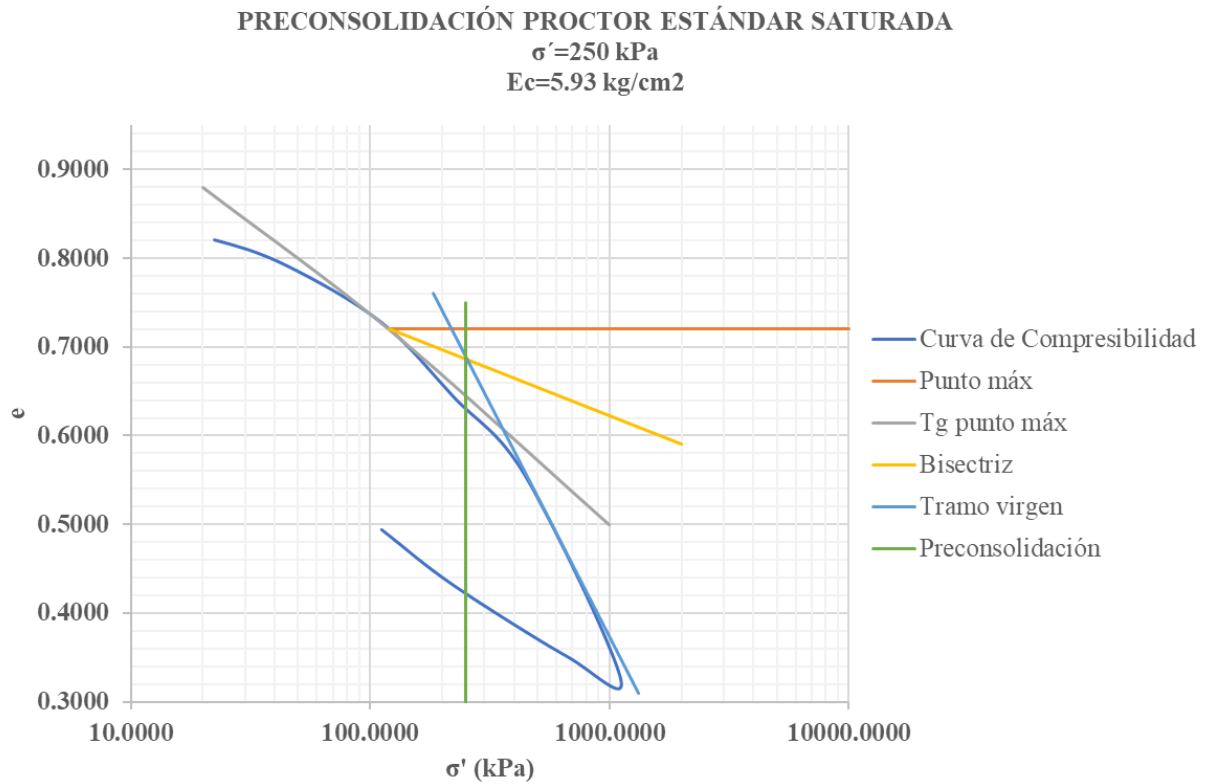
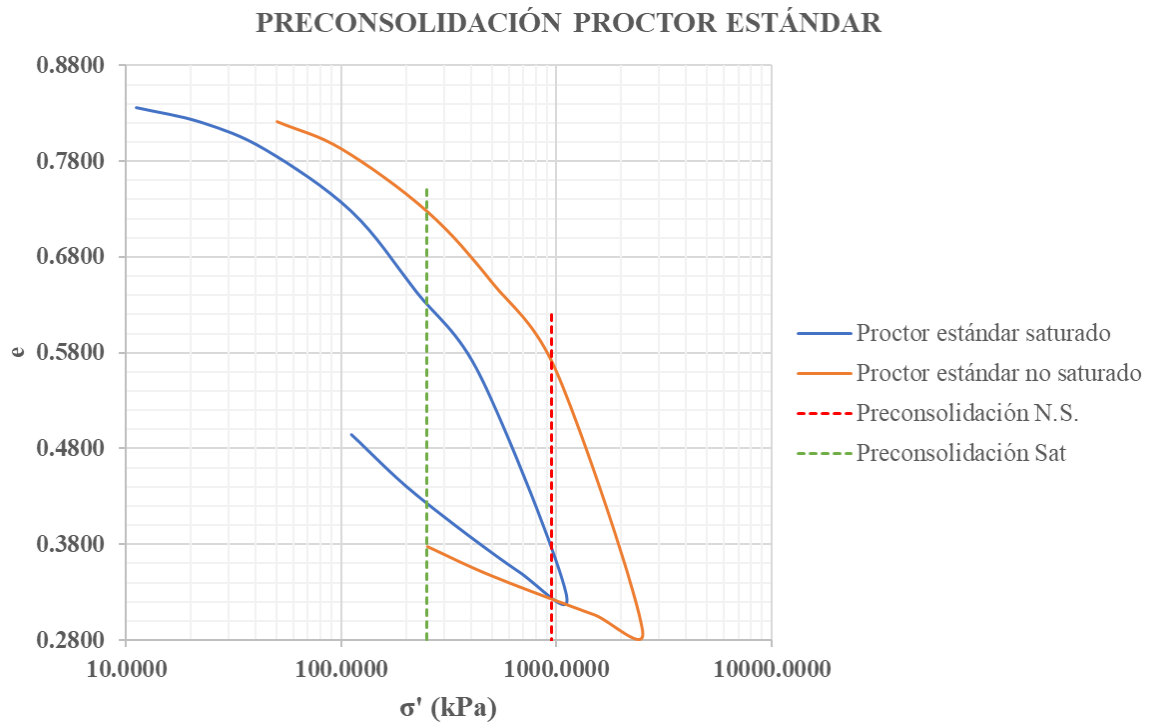


Tabla 13 Curva de compresibilidad Proctor estándar saturada

Curva de compresibilidad (Proctor estándar saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	E
0	0.0000	0.0000	0.0000	1.9200	0.8410
5	0.1138	11.1591	0.0050	1.9150	0.8362
10	0.2276	22.3182	0.0210	1.8990	0.8209
20	0.4552	44.6363	0.0511	1.8689	0.7920
50	1.1379	111.5908	0.1181	1.8019	0.7278
100	2.2758	223.1816	0.2055	1.7145	0.6440
200	4.5517	446.3632	0.2989	1.6211	0.5544
500	11.3792	1115.9081	0.5369	1.3831	0.3262
300	6.8275	669.5448	0.5110	1.4090	0.3510
100	2.2758	223.1816	0.4270	1.4930	0.4316
50	1.1379	111.5908	0.3615	1.5585	0.4944



Gráfica 27 Preconsolidación método Casagrande (Proctor Saturada)

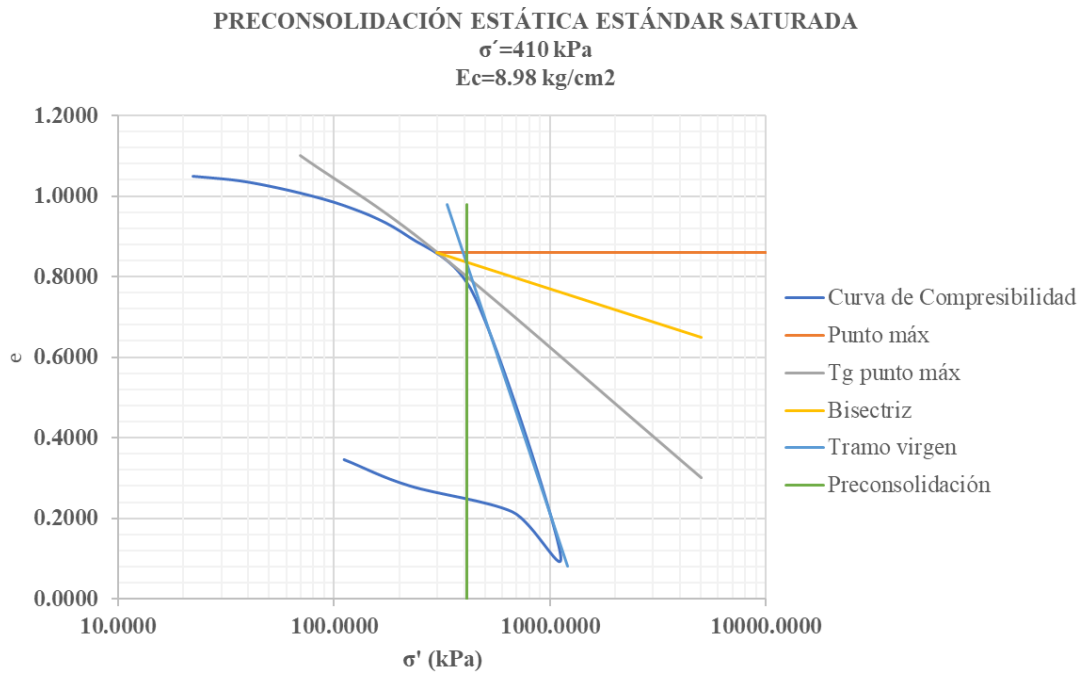


Gráfica 28 Comparativa de preconsolidación Proctor estándar saturada y no saturada

7.6. Compresibilidad y preconsolidación de compactación estática estándar

Tabla 14 Curva de compresibilidad estática estándar saturada

Curva de compresibilidad (Estática estándar saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm2)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	e
0	0.0000	0.0000	0.0000	1.9500	1.0707
5	0.1132	11.0988	0.0102	1.9398	1.0599
10	0.2264	22.1976	0.0203	1.9297	1.0491
20	0.4527	44.3952	0.0381	1.9119	1.0303
50	1.1318	110.9880	0.0889	1.8611	0.9763
100	2.2635	221.9760	0.1626	1.7874	0.8981
200	4.5271	443.9520	0.2997	1.6503	0.7524
500	11.3177	1109.8801	0.9017	1.0483	0.1132
300	6.7906	665.9280	0.8052	1.1448	0.2157
100	2.2635	221.9760	0.7442	1.2058	0.2804
50	1.1318	110.9880	0.6833	1.2667	0.3452

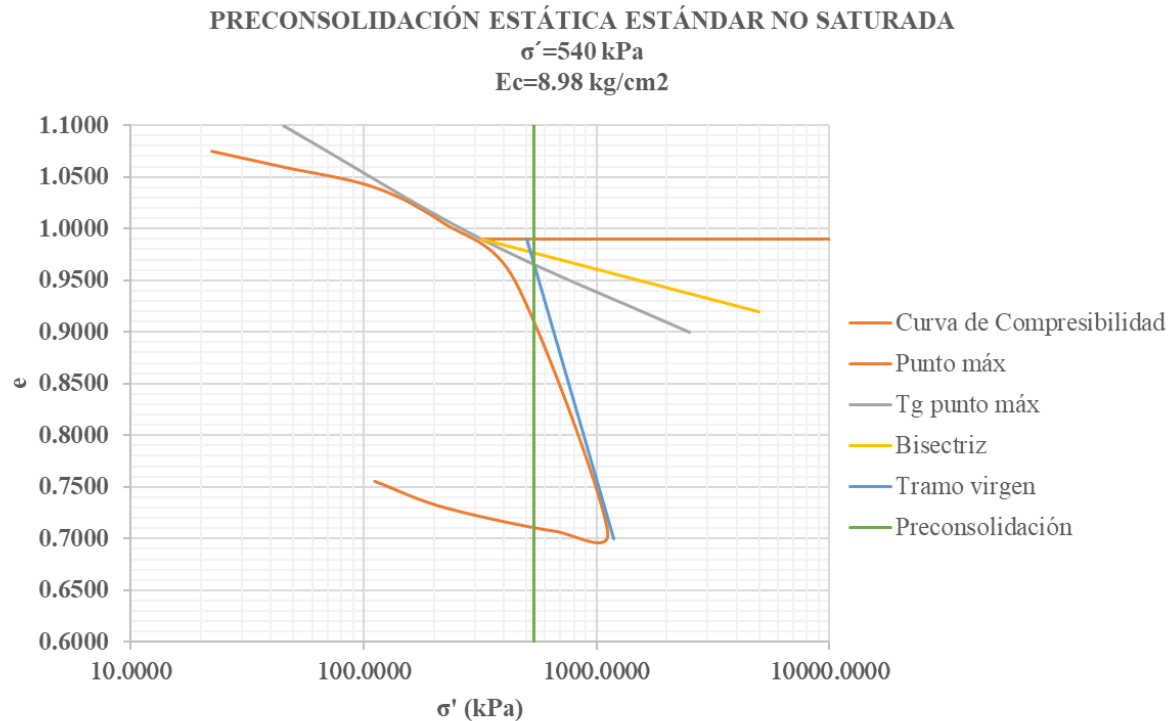


Gráfica 29 Preconsolidación método Casagrande (Estática estándar Saturada)

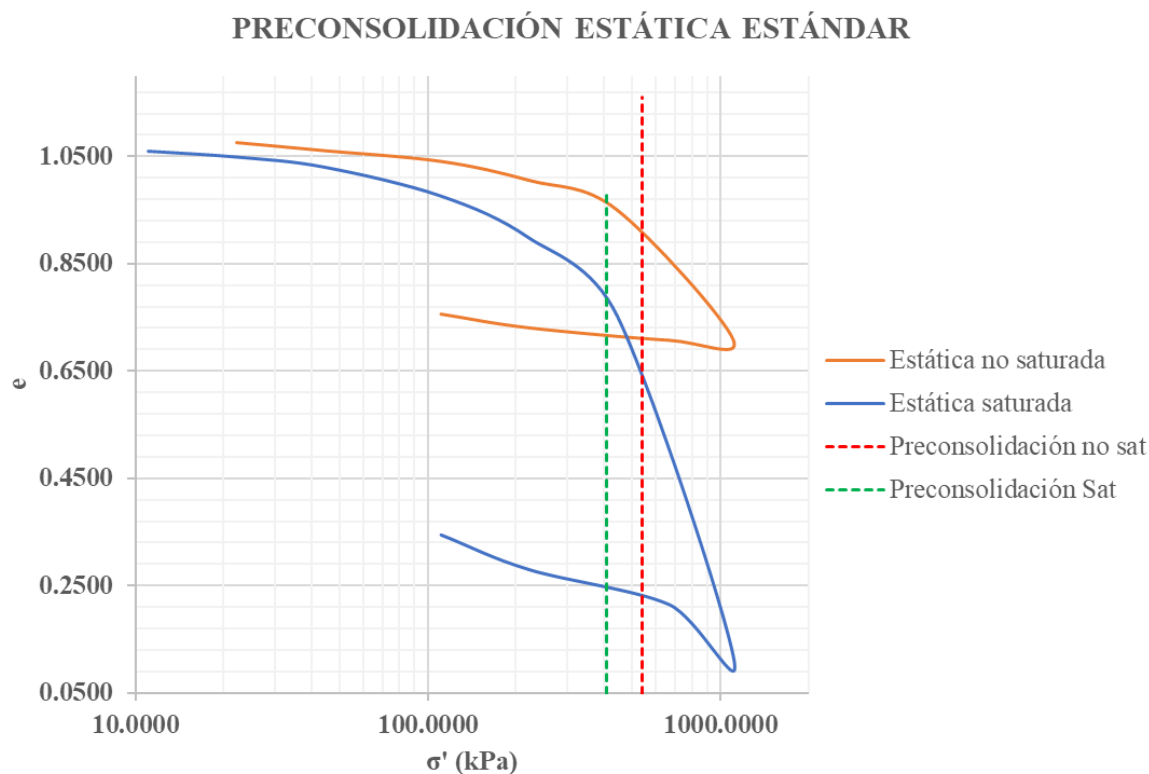
Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 15 Curva de compresibilidad estática estándar no saturada

Curva de compresibilidad (Estática estándar no saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	E
0	0.0000	0.0000	0.0000	1.9300	1.0901
10	0.2264	22.1976	0.0640	1.8660	1.0751
20	0.4527	44.3952	0.0835	1.8465	1.0601
50	1.1318	110.9880	0.1100	1.8200	1.0401
100	2.2635	221.9760	0.1500	1.7800	1.0049
200	4.5271	443.9520	0.1910	1.7390	0.9499
500	11.3177	1109.8801	0.2840	1.6460	0.7079
300	6.7906	665.9280	0.2845	1.6455	0.7073
100	2.2635	221.9760	0.2290	1.7010	0.7303
50	1.1318	110.9880	0.2065	1.7235	0.7558



Gráfica 30 Preconsolidación método Casagrande (Estática estándar no saturada)



Gráfica 31 Comparativa de preconsolidación estática estándar saturada y no saturada

7.7. Compresibilidad y preconsolidación de compactación Proctor Modificada

Tabla 16 Curva de compresibilidad Proctor modificada saturada

Curva de compresibilidad (Proctor modificada saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	e
0	0.0000	0.0000	0.0000	1.9700	0.6374
5	0.1074	10.5297	0.0940	1.8760	0.5593
10	0.2147	21.0595	0.1910	1.7790	0.4786
20	0.4295	42.1189	0.2015	1.7685	0.4699
50	1.0737	105.2973	0.2745	1.6955	0.4492
100	2.1475	210.5946	0.3345	1.6355	0.4194
200	4.2950	421.1891	0.3910	1.5790	0.3124
500	10.7374	1052.9728	0.5469	1.4231	0.1828
300	6.4424	631.7837	0.5358	1.4342	0.1921
100	2.1475	210.5946	0.4929	1.4771	0.2277

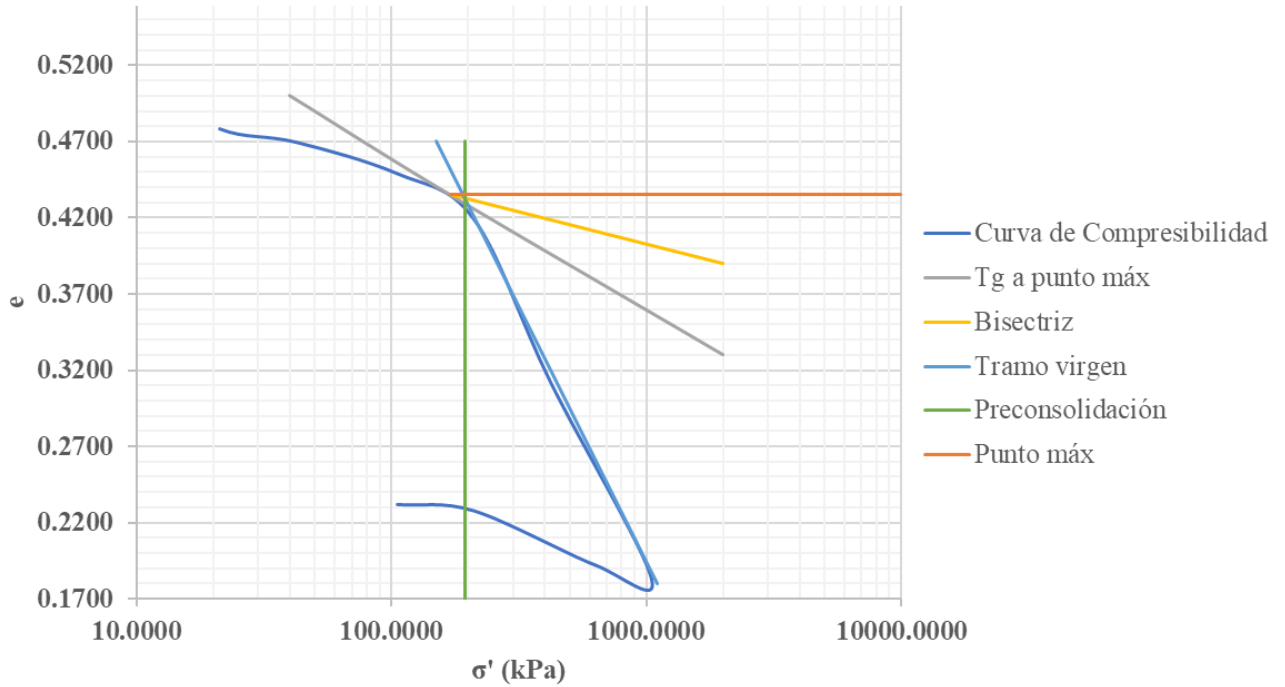
Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

50	1.0737	105.2973	0.4879	1.4821	0.2319
----	--------	----------	--------	--------	--------

PRECONSOLIDACIÓN PROCTOR MODIFICADA SATURADA

$$\sigma' = 195 \text{ kPa}$$

$$E_c = 63.63 \text{ kg/cm}^2$$



Gráfica 32 Preconsolidación método Casagrande (Proctor modificada saturada)

Tabla 17 Curva de compresibilidad Proctor modificada no saturada

Curva de compresibilidad (Proctor modificada no saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	E
0	0	0	0	1.95	0.6374
10	0.242233445	23.75486501	0.15	1.8	0.524393
20	0.48446689	47.50973001	0.2501	1.6999	0.517393
50	1.211167224	118.774325	0.3051	1.6449	0.5012099
100	2.422334449	237.5486501	0.3241	1.6259	0.4652557
200	4.844668898	475.0973001	0.3701	1.5799	0.3966299
500	12.11167224	1187.74325	0.4521	1.4979	0.2577751

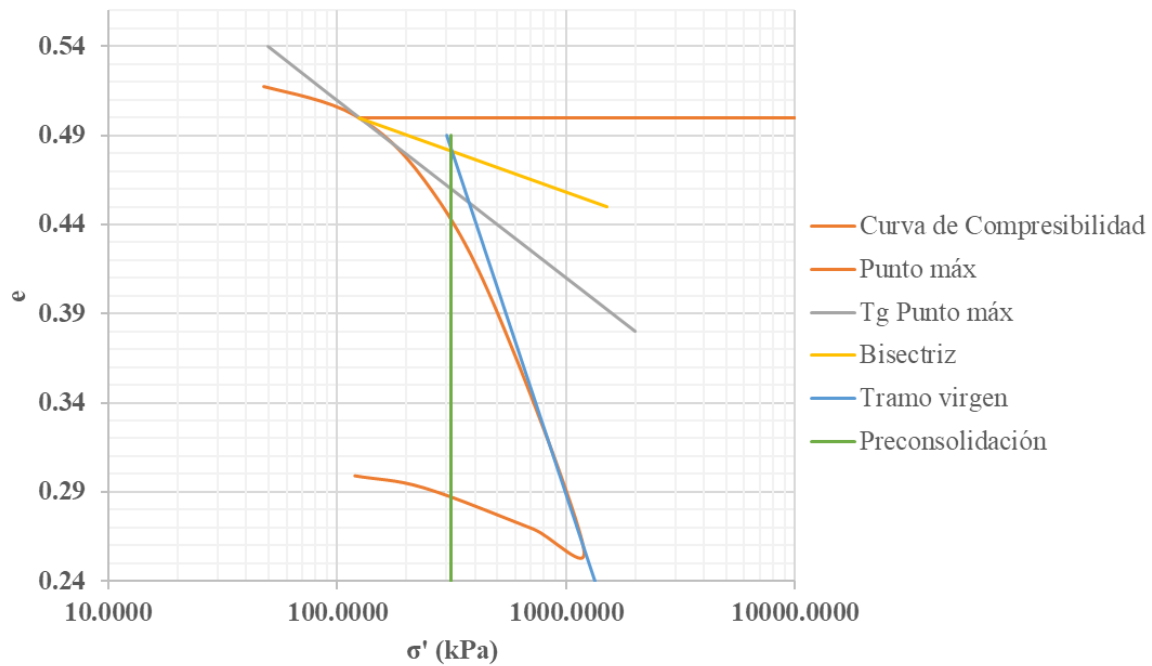
Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

300	7.267003347	712.6459502	0.4386	1.5114	0.269111
100	2.422334449	237.5486501	0.4111	1.5389	0.2922025
50	1.211167224	118.774325	0.4031	1.5469	0.29892

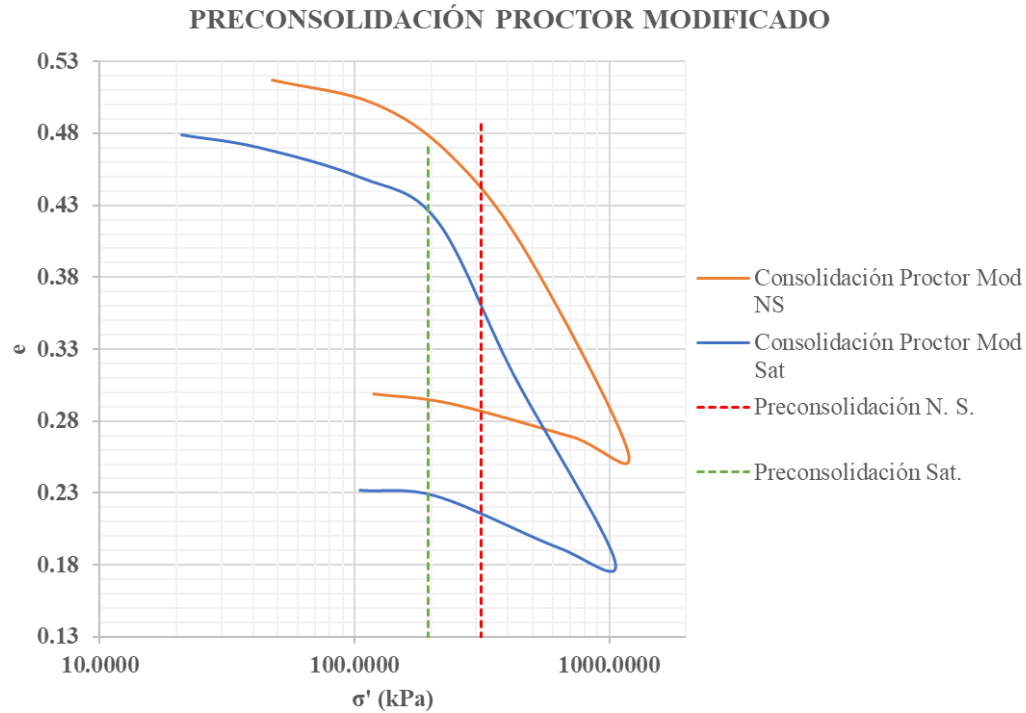
PRECONSOLIDACIÓN PROCTOR MODIFICADA NO SATURADA

$\sigma' = 313 \text{ kPa}$

$E_c = 63.63 \text{ kg/cm}^2$



Gráfica 33 Preconsolidación método Casagrande (Proctor modificada no saturada)

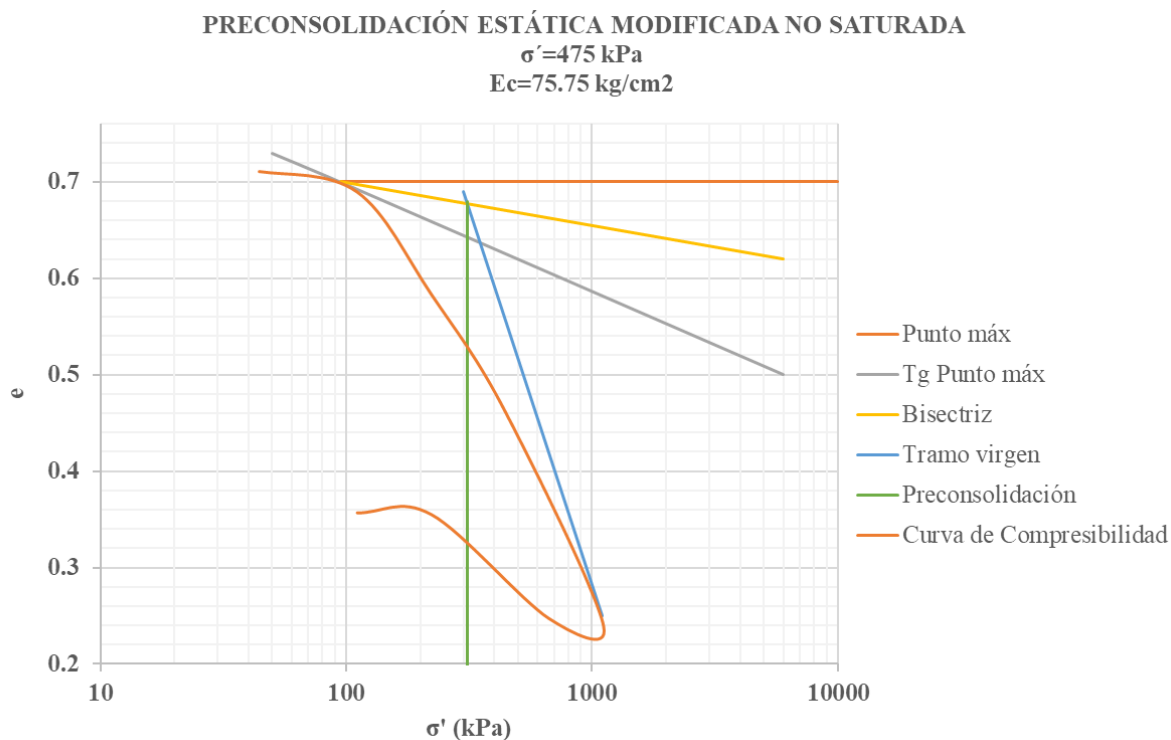


Gráfica 34 Comparativa de preconsolidación Proctor modificada saturada y no saturada

7.8. Compresibilidad y preconsolidación de compactación estática modificada

Tabla 18 Curva de compresibilidad estática modificada no saturada

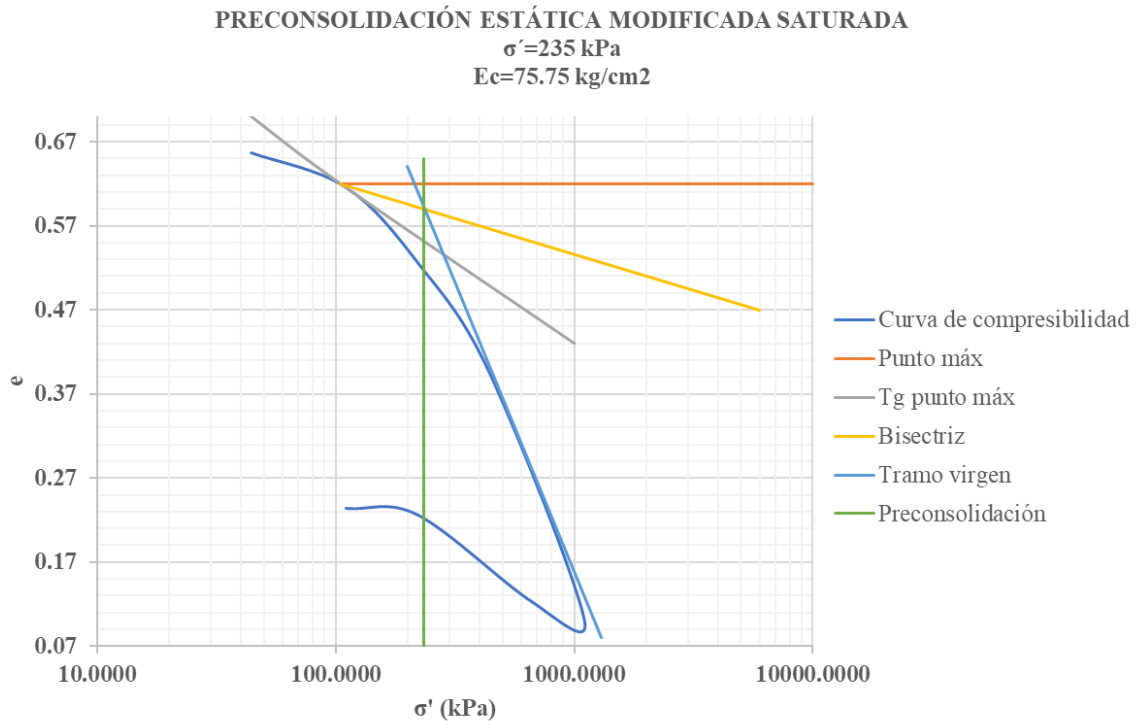
Curva de compresibilidad (Estática modificada no saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	e
0	0.0000	0.0000	0.0000	1.9500	0.7164
10	0.2264	22.1976	0.0230	1.9270	0.7162
20	0.4527	44.3952	0.0286	1.9214	0.7112
50	1.1318	110.9880	0.0346	1.9154	0.6900
100	2.2635	221.9760	0.0486	1.9014	0.5836
200	4.5271	443.9520	0.0626	1.8874	0.4613
500	11.3177	1109.8801	0.0876	1.8624	0.2393
300	6.7906	665.9280	0.0786	1.8714	0.2472
100	2.2635	221.9760	0.0696	1.8804	0.3552
50	1.1318	110.9880	0.0676	1.8824	0.3569



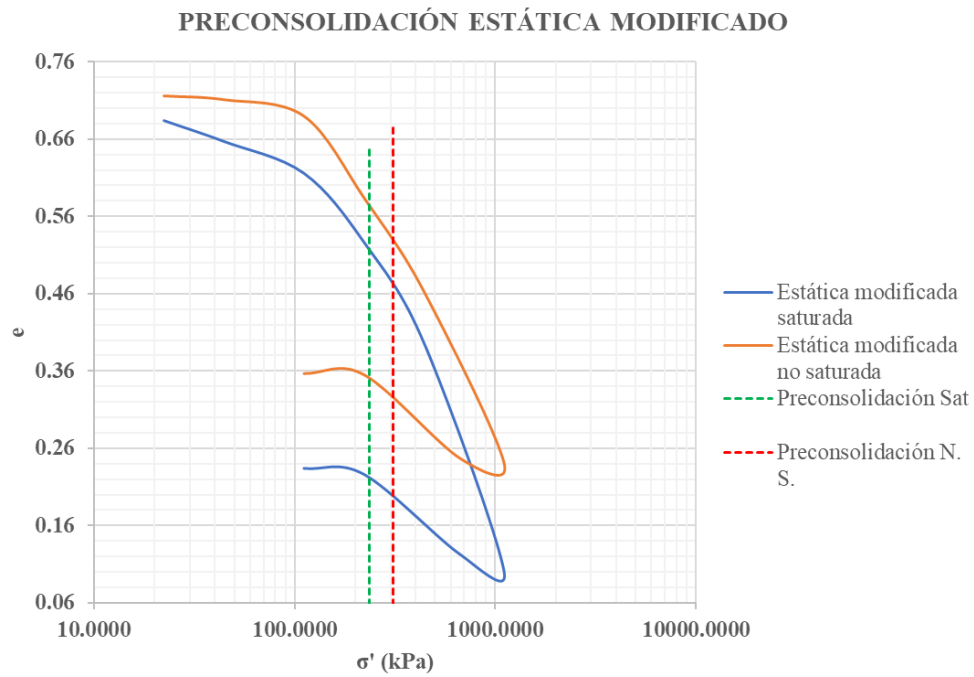
Gráfica 35 Preconsolidación método Casagrande (Estática modificada no saturada)

Tabla 19 Curva de compresibilidad estática modificada saturada

Curva de compresibilidad (Estática modificada saturada)					
Carga	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo (kPa)	Lectura (cm)	H (cm)	e
0	0.0000	0.0000	0.0000	1.9300	0.6837
10	0.2264	22.1976	0.0000	1.9300	0.6837
20	0.4527	44.3952	0.0310	1.8990	0.6567
50	1.1318	110.9880	0.0780	1.8520	0.6157
100	2.2635	221.9760	0.2380	1.6920	0.5261
200	4.5271	443.9520	0.3311	1.5989	0.3949
500	11.3177	1109.8801	0.6691	1.2609	0.1000
300	6.7906	665.9280	0.6421	1.2879	0.1235
100	2.2635	221.9760	0.5241	1.4059	0.2265
50	1.1318	110.9880	0.5151	1.4149	0.2343



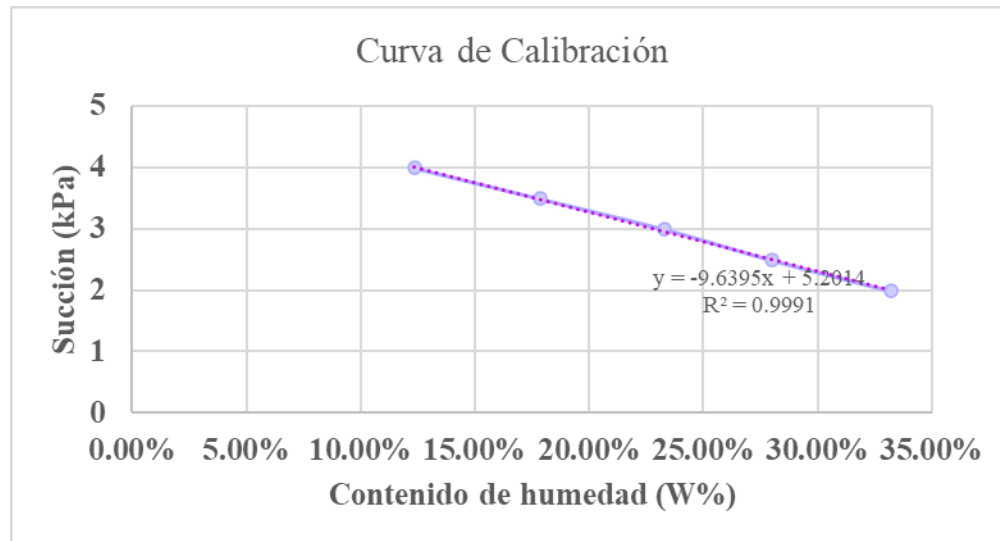
Gráfica 36 Preconsolidación método Casagrande (Estática modificada saturada)



7.9. Calibración de papel filtro

Tabla 20 Calibración de caja 1 de papel filtro Whatman No. 42

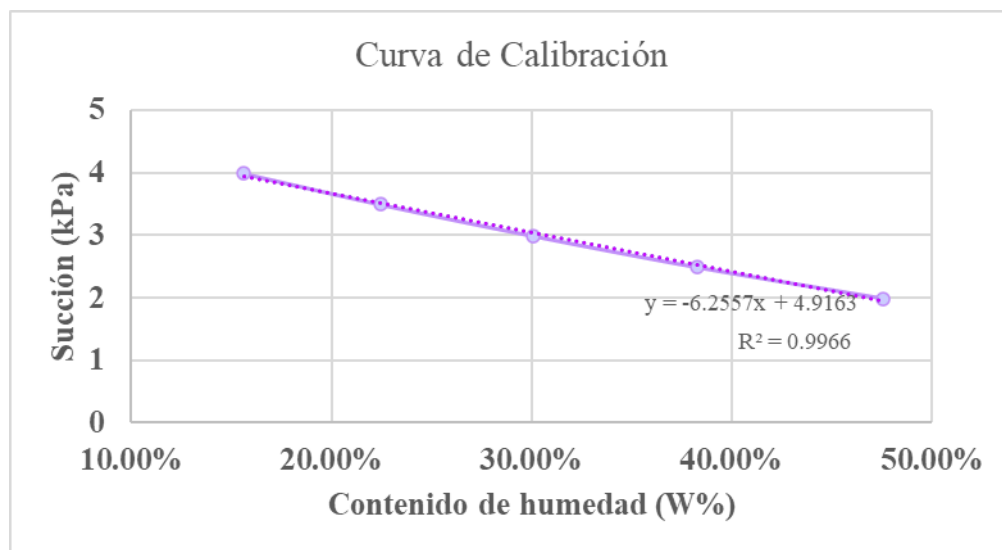
ANILLO	CONCENTRACIÓN	P.F.S.	P.F.H.	W (%)	PROM.
A37	0.13	0.1822	0.2439	34%	33%
A39		0.1895	0.2511	33%	
A32	0.38	0.2052	0.2598	27%	28%
A38		0.1912	0.2474	29%	
A31	1.31	0.2071	0.2544	23%	23%
A33		0.1937	0.2398	24%	
A30	3.9	0.1903	0.2244	18%	18%
A35		0.2041	0.2404	18%	
A36	12.25	0.1896	0.213	12%	12%
A34		0.2032	0.2283	12%	



Gráfica 37 Curva de calibración de caja 1 de papel filtro Whatman No. 42

Tabla 21 Calibración de caja 2 de papel filtro Whatman No. 42

ANILLO	CONCENTRACIÓN	P.F.S.	P.F.H.	W (%)	PROM.
0.13A	0.13	0.1977	0.2833	43%	48%
0.13B		0.1984	0.3012	52%	
A32	0.38	0.2008	0.2745	37%	38%
A38		0.1992	0.2785	40%	
A31	1.31	0.1986	0.2568	29%	30%
A33		0.2036	0.2663	31%	
A30	3.9	0.201	0.2461	22%	22%
A35		0.198	0.2426	23%	
A36	12.25	0.2001	0.234	17%	16%
A34		0.2001	0.2287	14%	



Gráfica 38 Curva de calibración de caja 2 de papel filtro Whatman No. 42

7.10. Medición de succión (Método de papel filtro)

7.10.1. Succión de Proctor estándar

Tabla 22 Preparación de muestras para Proctor estándar

ANILLO	Inf. Anillos		Wm (anillo + alumi)	Yd obtenido	Yd calculado	Ws calculado	Ws obtenido	W esperado	Wtotal obtenido
	W anillo	V anillo							
B15	22.0206	58.2725	108.5620	1.4790	1.4231	82.9262	86.1864	108.5620	108.5620
B3	22.0206	58.2725	98.8438	1.3061	1.4231	82.9262	76.1091	101.7726	101.1389
A39	24.5632	63.4873	112.4319	1.3779	1.4231	90.3473	87.4810	118.4662	118.6524
A36	21.1786	55.6496	104.0121	1.4814	1.4231	79.1937	82.4377	111.2885	111.6920
B5	22.0206	58.2725	102.2409	1.3705	1.4231	82.9262	79.8606	113.3844	111.3183
A32	21.8421	57.8455	105.5164	1.4398	1.4231	82.3186	83.2877	118.5798	118.9585
A21	23.1037	61.1896	115.1201	1.4968	1.4231	87.0775	91.5886	130.9058	130.9910
B10	22.4787	58.2941	106.3476	1.4324	1.4231	82.9570	83.5013	127.5428	127.8522
B12	22.0206	58.2725	103.2722	1.3887	1.4231	82.9262	80.9250	127.9803	127.2832
A108	22.4787	59.3149	107.7561	1.4312	1.4231	84.4096	84.8929	134.7409	134.0910

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 23 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Proctor estándar)

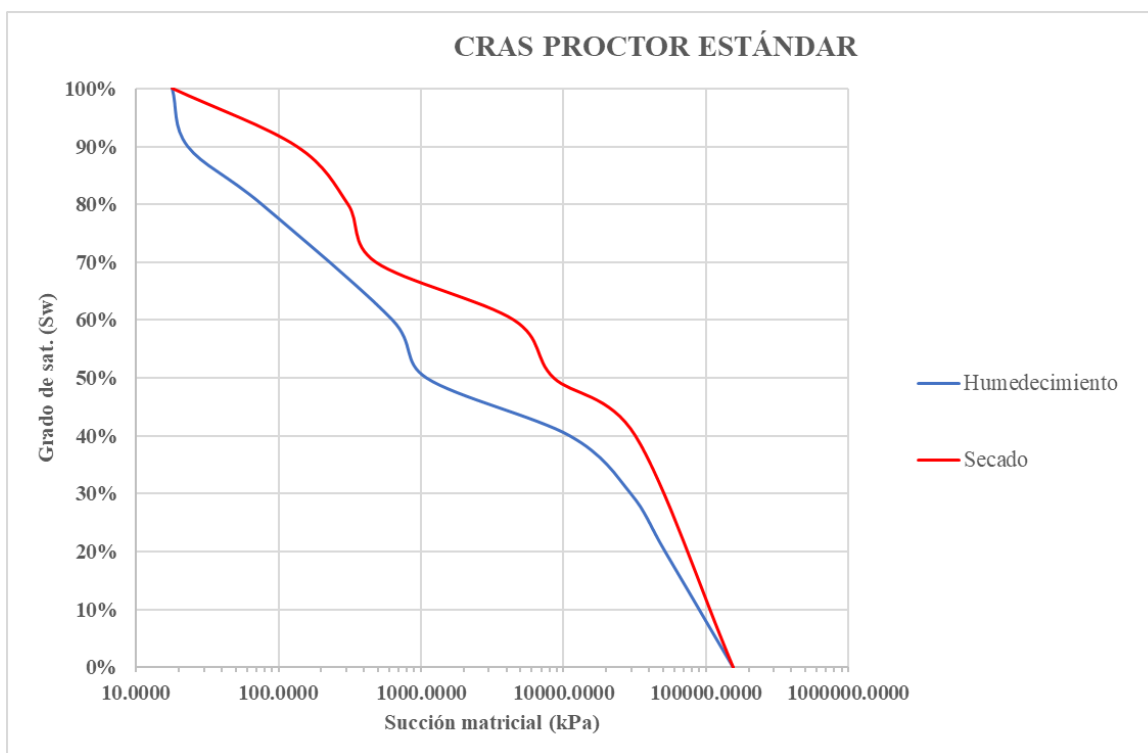
Sw	e	Vs	Vv	Ss	Vw
0%	0.7754	32.8227	25.4498	2.6258	0.0000
10%	1.0104	28.9849	29.2875	2.6258	2.9288
20%	0.9056	33.3157	30.1715	2.6258	6.0343
30%	0.7726	31.3951	24.2545	2.6258	7.2764
40%	0.9160	30.4136	27.8589	2.6258	11.1435
50%	0.8237	31.7188	26.1267	2.6258	13.0634
60%	0.7543	34.8801	26.3095	2.6258	15.7857
80%	0.8331	31.8001	26.4940	2.6258	21.1952
90%	0.8908	30.8190	27.4535	2.6258	24.7081
100%	0.8347	32.3301	26.9848	2.6258	26.9848

Tabla 24 Trayectoria de humedecimiento (Proctor estándar)

PFS			PFH			Humedecimiento			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión Matricial	
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1500	0.1190	0.1157	0.1494	0.1191	0.1162	0.08%	0.43%	5.1933	156062.8666
0.1418	0.1221	0.1202	0.1437	0.1233	0.1212	0.98%	0.83%	5.1067	127838.8630
0.1435	0.1171	0.1220	0.1514	0.1230	0.1278	5.04%	4.75%	4.7157	51966.1648
0.1490	0.1181	0.1161	0.1615	0.1270	0.1267	7.54%	9.13%	4.4750	29851.6668
0.1416	0.1178	0.1169	0.1591	0.1319	0.1308	11.97%	11.89%	4.0476	11158.5010
0.1449	0.1160	0.1190	0.1790	0.1420	0.1466	22.41%	23.19%	3.0408	1098.5565
0.1438	0.1185	0.1167	0.1809	0.1480	0.1459	24.89%	25.02%	2.8017	633.4222
0.1422	0.1197	0.1163	0.1960	0.1609	0.1637	34.42%	40.76%	1.8835	76.4793
0.1468	0.1163	0.1171	0.2154	0.1626	0.1735	39.81%	48.16%	1.3638	23.1118
0.1370	0.1207	0.1163	0.2463	0.1701	0.1718	40.93%	47.72%	1.2562	18.0365

Tabla 25 Trayectoria de secado (Proctor estándar)

PFS			PFH			Secado			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión Matricial	
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1375	0.1100	0.1141	0.1405	0.1132	0.1175	2.91%	2.98%	4.9210	156062.8666
0.1390	0.1147	0.1138	0.1450	0.1204	0.1191	4.97%	4.66%	4.7224	52767.4897
0.1316	0.1098	0.1151	0.1448	0.1179	0.1224	7.38%	6.34%	4.4903	30923.5500
0.1429	0.1092	0.1138	0.1559	0.1189	0.1243	8.88%	9.23%	4.3451	22138.2887
0.1373	0.1152	0.1123	0.1474	0.1235	0.1208	7.20%	7.57%	4.5069	32128.2754
0.1330	0.1133	0.1123	0.1500	0.1282	0.1267	13.15%	12.82%	3.9337	8584.5279
0.1365	0.1171	0.1113	0.1597	0.1359	0.1296	16.05%	16.44%	3.6538	4506.2119
0.1442	0.1168	0.1163	0.1826	0.1473	0.1468	26.11%	26.23%	2.6842	483.3214
0.1404	0.1123	0.1141	0.2651	0.1439	0.1449	28.14%	26.99%	2.4889	308.2829
0.1341	0.1139	0.1170	0.2315	0.1502	0.1521	31.87%	30.00%	2.1293	134.6745
0.1413	0.1098	0.1153	0.2799	0.1477	0.1532	34.52%	32.87%	1.8741	18.0365



Gráfica 39 Curvas de retención - agua suelo (Proctor estándar)

7.10.2. Succión de estática estándar

Tabla 26 Preparación de muestras para estática estándar

Inf. Anillos			Ws	Ws (anillo	Ws	Yd	Yd	Wtotal	
ANILLO	W anillo	V anillo	calculado	+ alumi)	obtenido	obtenido	calculado	W esperado	obtenido
B15	22.0206	58.2725	82.9262	103.7771	81.3546	1.3961	1.4231	103.7771	108.5620
B3	22.0206	58.2725	82.9262	100.3078	77.9147	1.3371	1.4231	102.9640	101.1389
A39	24.5632	63.4873	90.3473	113.0272	88.0926	1.3876	1.4231	118.8151	118.8330
A3	21.2144	59.9363	85.2940	105.3774	83.7705	1.3977	1.4231	113.5736	113.5081
B5	22.0206	58.2725	82.9262	99.0801	76.7000	1.3162	1.4231	109.7050	109.7345
A32	21.8421	57.8455	82.3186	102.3100	80.1631	1.3858	1.4231	115.4938	115.4760
A21	23.1037	61.1896	87.0775	107.7883	84.4907	1.3808	1.4231	124.5235	124.4332
A29	21.7413	57.4274	81.7236	101.3847	79.4005	1.3826	1.4231	119.7086	119.8550
B10	22.4787	58.2941	82.9570	102.3766	79.6439	1.3662	1.4231	123.6343	123.2908
B12	22.0206	58.2725	82.9262	102.2272	79.9224	1.3715	1.4231	126.1333	126.2380
A108	22.4787	59.3149	84.4096	104.9054	82.0449	1.3832	1.4231	131.9428	131.2364

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 27 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Estática estándar)

Sw	e calculado	e real	Vs	Vv	Ss	Vw
0%	0.8411	0.8452	31.5811	26.6914	2.6258	0.0000
10%	0.8411	0.8452	31.5811	26.6914	2.6258	2.6562
20%	0.8411	0.8452	34.4073	29.0800	2.6258	5.7879
30%	0.8411	0.8452	32.4829	27.4535	2.6258	8.1962
40%	0.8411	0.8452	31.5811	26.6914	2.6258	10.6249
50%	0.8411	0.8452	31.3497	26.4958	2.6258	13.1838
60%	0.8411	0.8452	33.1621	28.0275	2.6258	16.7352
70%	0.8411	0.8452	31.1231	26.3043	2.6258	18.3239
80%	0.8411	0.8452	31.5929	26.7013	2.6258	21.2577
90%	0.8411	0.8452	31.5811	26.6914	2.6258	23.9061
100%	0.8411	0.8452	32.1461	27.1688	2.6258	27.0374

Tabla 28 Trayectoria de humedecimiento (Estática estándar)

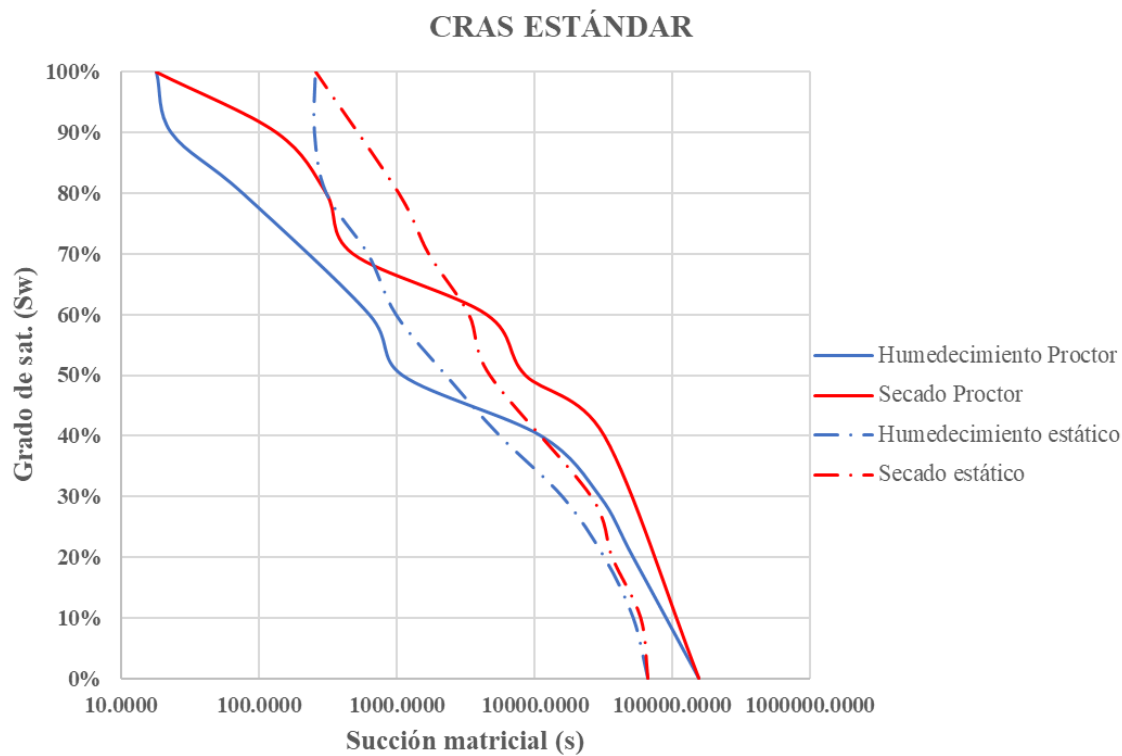
PFS			PFH			Humedecimiento			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión Matricial	
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1588	0.1386	0.1350	0.1595	0.1407	0.1361	1.52%	0.81%	4.8215	66300.479
0.1568	0.1367	0.1339	0.1621	0.1411	0.1382	3.22%	3.21%	4.7149	51873.564
0.1587	0.1384	0.1331	0.1703	0.1475	0.142	6.58%	6.69%	4.5050	31987.381
0.1594	0.1399	0.1360	0.1781	0.1559	0.1514	11.44%	11.32%	4.2009	15880.048
0.1564	0.1365	0.1346	0.1874	0.162	0.1605	18.68%	19.24%	3.7477	5593.102
0.1534	0.1316	0.1387	0.1929	0.1644	0.1739	24.92%	25.38%	3.3571	2275.771
0.1536	0.1339	0.1397	0.2144	0.175	0.1833	30.69%	31.21%	2.9961	991.154
0.1576	0.1346	0.1366	0.2104	0.1803	0.1868	33.95%	36.75%	2.7923	619.921
0.1507	0.1287	0.1326	0.2452	0.1786	0.1938	38.77%	46.15%	2.4908	309.613
0.1577	0.1370	0.1368	0.2471	0.192	0.204	40.15%	49.12%	2.4049	254.032
0.1546	0.1356	0.1384	0.3348	0.1899	0.2029	40.04%	46.60%	2.4113	257.782

Tabla 29 Trayectoria de secado (Estática estándar)

PFS			PFH			Secado			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión Matricial	
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1546	0.1306	0.1331	0.1568	0.1331	0.1356	1.91%	1.88%	4.7966	66300.4791
0.1526	0.1273	0.1342	0.1557	0.1303	0.1376	2.36%	2.53%	4.7689	58732.1373
0.1530	0.1304	0.1334	0.162	0.1378	0.1405	5.67%	5.32%	4.5613	36416.5349
0.1537	0.1321	0.1297	0.1665	0.1428	0.1399	8.10%	7.86%	4.4096	25679.8827
0.1524	0.1319	0.1282	0.1791	0.1547	0.1508	17.29%	17.63%	3.8350	13370.0160
0.1547	0.1339	0.1343	0.1864	0.1605	0.1616	19.87%	20.33%	3.6736	4715.9529
0.1535	0.1324	0.1301	0.1902	0.1619	0.1587	22.28%	21.98%	3.5225	3330.1942
0.1544	0.1336	0.1319	0.2012	0.1696	0.1676	26.95%	27.07%	3.2306	1700.7181
0.1558	0.1338	0.1319	0.2084	0.1745	0.1721	30.42%	30.48%	3.0134	1031.3539
0.1551	0.1321	0.1332	0.2036	0.1688	0.1713	27.78%	28.60%	3.1783	698.3320
0.1534	0.1335	0.1315	0.2228	0.1902	0.188	42.47%	42.97%	2.2594	257.7816



Gráfica 40 Curvas de retención - agua suelo (estática estándar)



Gráfica 41 Curvas de secado y humedecimiento Proctor estándar y estática estándar

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 30 Preparación de muestras para Proctor modificada

Inf. Anillos			Ws	Wm (anillo + alumi)	Yd compactado	Wm esperado	Wtotal obtenido
ANILLO	W anillo	V anillo					
A115	21.8939	59.3921	96.2317	118.5134	1.594	118.5134	118.5134
A12	22.3638	60.2707	103.4422	126.1726	1.594	128.2602	128.2830
A13	22.6138	60.9736	101.3853	124.3358	1.594	128.8083	128.4032
A14	23.5084	62.2845	107.1603	130.9882	1.594	137.4305	137.4438
A15	22.3974	60.4464	104.5890	127.2268	1.594	135.4730	135.5515
A16	20.1892	52.6672	84.2530	104.8130	1.594	115.1034	115.1372
A17	20.8043	55.6418	93.4575	114.5424	1.594	126.5724	126.5795
A18	23.0614	62.1140	108.2657	131.5821	1.594	146.2000	146.2146
A19	22.5494	60.2707	97.4233	120.3449	1.594	138.8798	138.6266
A20	20.8594	55.3506	90.7356	111.8004	1.594	130.5163	130.5867
A8	21.1609	67.6219	87.6569	109.1013	1.594	143.3405	142.5691

Tabla 31 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Proctor modificada)

Sw	e	Vs	Vv	Ss	Vw
0%	0.6206	36.6483	22.7438	2.6258	0.0000
10%	0.5299	39.3943	20.8764	2.6258	2.0876
20%	0.5792	38.6110	22.3626	2.6258	4.4725
30%	0.5262	40.8103	21.4742	2.6258	6.4423
40%	0.5176	39.8310	20.6154	2.6258	8.2462
50%	0.6414	32.0864	20.5808	2.6258	10.2904
60%	0.5633	35.5918	20.0500	2.6258	12.0300
70%	0.5065	41.2313	20.8827	2.6258	14.6179
80%	0.6245	37.1021	23.1686	2.6258	18.5349
90%	0.6018	34.5552	20.7954	2.6258	18.7159
100%	1.0257	33.3827	34.2392	2.6258	34.2392

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 32 Trayectoria de humedecimiento (Proctor modificada)

PFS			PFH			Humedecimiento			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión	Matricial
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1449	0.1146	0.1150	0.1452	0.1148	0.1155	0.17%	0.43%	5.1846	152959.7404
0.1435	0.1115	0.1208	0.1465	0.1140	0.1236	2.24%	2.32%	4.9853	96664.6567
0.1451	0.1148	0.1138	0.1510	0.1193	0.1280	3.92%	12.48%	4.8235	66610.8591
0.1412	0.1163	0.1193	0.1515	0.1281	0.1283	10.15%	7.54%	4.2234	26724.7482
0.1412	0.1159	0.1155	0.1560	0.1275	0.1271	10.01%	10.04%	4.2366	12243.2169
0.1414	0.1164	0.1164	0.1651	0.1351	0.1354	16.07%	16.32%	3.6528	4495.5845
0.1459	0.1162	0.1138	0.1739	0.1383	0.1346	19.02%	18.28%	3.3681	2333.8340
0.1424	0.1193	0.1177	0.1748	0.1452	0.1444	21.71%	22.68%	3.1087	1284.3015
0.1443	0.1189	0.1134	0.1863	0.1603	0.1443	34.82%	27.25%	1.8450	89.9851
0.1445	0.1179	0.1143	0.2062	0.1621	0.1470	37.49%	28.61%	1.5876	38.6910
0.1448	0.1182	0.1136	0.2106	0.1629	0.1475	37.82%	29.84%	1.5560	16.5269

Tabla 33 Trayectoria de secado (Proctor modificada)

PFS			PFH			Secado			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión	Matricial
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1402	0.1106	0.1117	0.1466	0.1145	0.1164	3.53%	4.21%	4.8615	152959.7404
0.1435	0.112	0.1124	0.1482	0.1179	0.1167	5.27%	3.83%	4.6936	112692.5600
0.1374	0.1136	0.1152	0.1898	0.1218	0.1216	7.22%	5.56%	4.5056	97381.5311
0.1364	0.1141	0.1142	0.1617	0.1241	0.1231	8.76%	7.79%	4.3566	73751.8034
0.1405	0.1146	0.1133	0.1511	0.1294	0.1252	12.91%	10.50%	3.9565	48626.2862
0.1420	0.1146	0.1155	0.1508	0.1298	0.1281	13.26%	10.91%	3.9229	10315.0045
0.1399	0.1147	0.1141	0.1538	0.1302	0.1286	13.51%	12.71%	3.8988	6674.6003
0.1408	0.1155	0.1136	0.1692	0.1351	0.1352	16.97%	19.01%	3.5656	2921.6866
0.1406	0.1160	0.1159	0.1668	0.1362	0.1369	17.41%	18.12%	3.5228	1812.8398
0.1402	0.1180	0.1104	0.1636	0.1377	0.1383	16.69%	25.27%	3.5921	86.6492
0.1448	0.1182	0.1136	0.1658	0.1534	0.1554	29.78%	36.80%	2.3308	16.5269

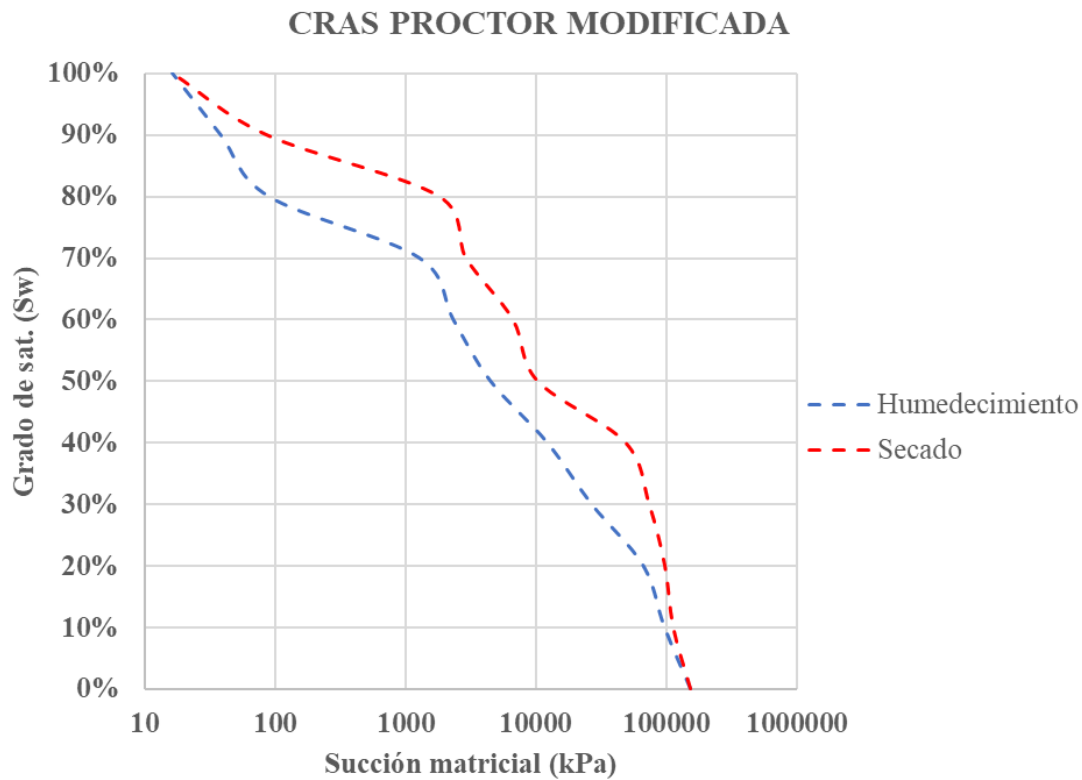


Tabla 34 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Estática modificada)

ANILLO	Inf. Anillos		Ws	Ws	Ww	Wm	Ws	Yd	W esperado	Wtotal
	W anillo	V anillo	calculado	obtenido	calculado	obtenido	compactado	compactado		obtenido
A115	21.8939	59.3921	94.6929	92.9598	21.3059	134.5000	112.6061	1.5944	115.2480	115.2480
A12	22.3638	60.2707	96.0936	93.6572	21.6211	135.4000	113.0362	1.5944	118.7723	118.6911
A13	22.6138	60.9736	97.2143	95.7551	21.8732	139.0000	116.3862	1.5944	123.5061	123.3017
A14	23.5084	62.2845	99.3044	97.0343	22.3435	141.3000	117.7916	1.5944	128.3101	128.2576
A15	22.3974	60.4464	96.3738	96.8848	21.6841	138.8000	116.4026	1.5944	129.2274	129.2179
A16	20.1892	52.6672	83.9709	81.1764	18.8935	119.5000	99.3108	1.5944	112.0679	112.4979
A17	20.8043	55.6418	88.7134	85.5860	19.9605	125.2000	104.3957	1.5944	119.9261	119.3677
A18	23.0614	62.1140	99.0325	94.6511	22.2823	139.0000	115.9386	1.5944	135.2305	135.7679
A19	22.5494	60.2707	96.0936	93.1032	21.6211	135.7000	113.1506	1.5944	135.0283	135.5290
A20	20.8594	55.3506	88.2493	85.4708	19.8561	125.4000	104.5406	1.5944	126.2559	126.4707
A8	21.1609	67.6219	107.8142	87.6569	24.2582	126.4000	105.2391	1.5944	135.6639	135.8956

Modelación elastoplástica de suelos compactados durante el colapso por humedecimiento

Tabla 35 Muestras para trayectoria de humedecimiento y secado (Estándar modificada)

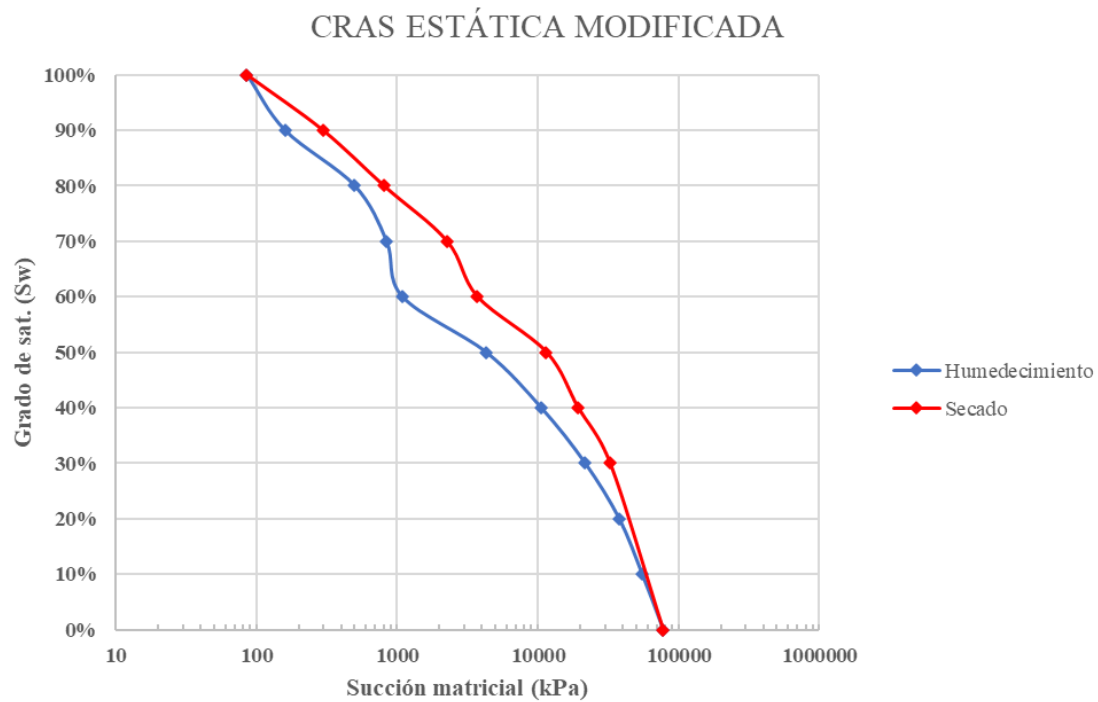
Sw	e	Vs	Vv	Ss	Vw
0%	0.6469	36.0623	23.3299	2.6258	-
10%	0.6469	36.5957	23.6750	2.6258	2.3675
20%	0.6469	37.0225	23.9511	2.6258	4.7902
30%	0.6469	37.8185	24.4660	2.6258	7.3398
40%	0.6469	36.7024	23.7440	2.6258	9.4976
50%	0.6469	31.9790	20.6882	2.6258	10.3441
60%	0.6469	33.7851	21.8567	2.6258	13.1140
70%	0.6469	37.7149	24.3990	2.6258	17.0793
80%	0.6469	36.5957	23.6750	2.6258	18.9400
90%	0.6469	33.6083	21.7423	2.6258	19.5681
100%	0.6469	41.0593	26.5626	2.6258	26.5626

Tabla 36 Trayectoria de humedecimiento (Estática modificada)

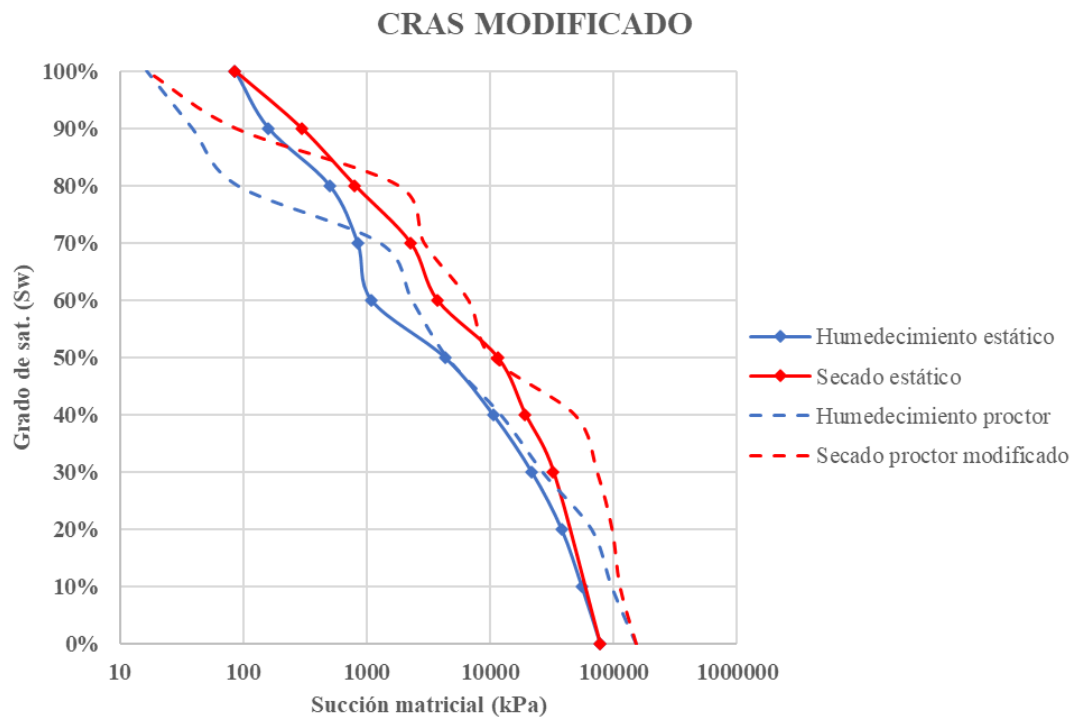
PFS			PFH			Humedecimiento			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión Matricial	
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.1568	0.1357	0.1386	0.1667	0.1363	0.1389	0.44%	0.22%	4.8886	77382.0640
0.1597	0.1339	0.1333	0.1653	0.1377	0.1369	2.84%	2.70%	4.7388	54798.2974
0.1543	0.1341	0.1386	0.1630	0.1414	0.1468	5.44%	5.92%	4.5758	37649.4415
0.1537	0.1322	0.1412	0.1689	0.1445	0.1545	9.30%	9.42%	4.3343	21590.5831
0.1578	0.1350	0.1376	0.1828	0.1543	0.1575	14.30%	14.46%	4.0220	10518.8096
0.1558	0.1334	0.1350	0.1897	0.1608	0.1637	20.54%	21.26%	3.6314	4279.5303
0.1546	0.1301	0.1276	0.1996	0.1692	0.1682	30.05%	31.82%	3.0362	1086.9865
0.1573	0.1325	0.1359	0.2303	0.1747	0.1777	31.85%	30.76%	2.9239	839.3026
0.1545	0.1372	0.1382	0.2130	0.1800	0.1857	31.20%	34.37%	2.9648	499.4663
0.1561	0.1321	0.1379	0.2475	0.1801	0.1954	36.34%	41.70%	2.6432	159.6300
0.1563	0.1323	0.1382	0.2562	0.1845	0.2045	39.46%	47.97%	2.4481	85.6232

Tabla 37 Trayectoria de secado (Estática modificada)

PFS			PFH			Secado			
Papel 1	Matricial	Total	Papel 1	Matricial	Total	Matricial	Total	Succión Matricial	
Inf	Med	Sup	Inf	Med	Sup			Log kPa	kPa
0.155	0.132	0.133	0.158	0.135	0.136	1.74%	1.65%	4.8075	77382.0640
0.157	0.132	0.130	0.163	0.137	0.134	3.93%	3.63%	4.6702	70265.3151
0.155	0.135	0.130	0.163	0.142	0.137	5.42%	5.38%	4.5773	30548.6500
0.157	0.131	0.131	0.168	0.140	0.139	6.47%	6.34%	4.5113	32458.1101
0.154	0.129	0.130	0.169	0.142	0.143	10.10%	10.22%	4.2844	19249.1302
0.156	0.132	0.135	0.186	0.158	0.160	19.45%	19.26%	3.6993	11483.8531
0.157	0.132	0.134	0.193	0.160	0.162	21.52%	20.78%	3.5704	3718.5760
0.156	0.133	0.135	0.213	0.174	0.171	30.90%	26.99%	2.9835	2260.7570
0.152	0.130	0.132	0.203	0.172	0.173	32.16%	30.91%	2.9047	802.9379
0.154	0.131	0.135	0.215	0.182	0.182	39.07%	34.34%	2.4724	296.7347
0.153	0.132	0.133	0.221	0.187	0.182	41.83%	37.58%	2.2998	85.6232



Gráfica 43 Curvas de retención - agua suelo (Estática modificado)



Gráfica 44 Curvas de secado y humedecimiento Proctor modificada y estática modificada