TRABAJO FINAL DE MÁSTER

TÍTULO

COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO DE LA ARCILLA BOOM COMPACTADA ESTÁTICA Y DINÁMICAMENTE.

AUTOR

MARLYN CELESTE MONTERO VICIOSO

TUTOR

ANTONIO LLORET MORANCHO

ENRIQUE ROMERO

ESPECIALIDAD

INGENIERIA GEOTÉCNICA

FECHA

9 Octubre 2014

Dep. de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por la vida, por amarme, por todo lo que me regala y permite en mi vida.

Al Mescyt, por la oportunidad de poder realizar este máster.

Agradezco a mis tutores, Enrique Romero, y en especial a Antonio Lloret, por el apoyo y la confianza puesta en mi para realizar este trabajo, por las horas dedicadas a mi transmitiéndome sus conocimientos de forma paciente y desinteresada.

A los encargados y compañeros del laboratorio, en especial a Rodrigo y Víctor, por su siempre amable y desinteresada ayuda en el laboratorio. Mil gracias!

Por supuesto, mis padres, hermanas, hermano y sobrinos, por el apoyo y el ánimo brindado; porque en los momentos duros, a pesar de no estar físicamente a mi lado, han sido los que me han ayudado a seguir hasta cumplir mi meta, los amo un montón y no puedo ni describir lo bendecida que me siento por tenerlos.

A mi moi amado, te incluye totalmente en lo descrito para mi familia, porque lo eres, pero de manera especial te agradezco tu amor, tu paciencia, por la espera, por... simplemente ser y estar siempre para mí.

A mis comunidades: La de RD, por sus oraciones. La de BCN, porque me acogieron de una manera increíble.

A mis compañeras de piso, desde las primeras hasta las últimas, pero en especial a mi Aris y a mi Per, por haber sido verdaderas hermanas para mí. A todos los chicos y chicas del máster, porque se portaron como familia durante nuestro paso por Barcelona, porque en los momentos que lo necesité, tuve su ayuda.

A todos y cada uno de los que de forma directa o indirecta han ayudado a cumplir esta meta.

A todos y todas,
Gracias!!!

RESUMEN

Las características hidromecánicas de los suelos compactados no dependen únicamente del tipo de suelo, es decir, granulometría y mineralogía; el comportamiento de los suelos compactados está controlado fundamentalmente por las variables densidad seca, contenido de humedad y la microestructura que se genera durante el proceso de compactación. Este comportamiento se puede caracterizar por su resistencia, deformabilidad, permeabilidad, entre otras propiedades, lo que implica que para un mismo suelo, cambios en el proceso de compactación ya sea la energía y carga de compactación, o la variación de alguna de estas variables, conducen a diferentes microestructuras y, por consiguiente, a diferentes respuestas hidromecánicas del suelo.

El material utilizado para la realización del estudio experimental es la arcilla Boom, proveniente de Bélgica. El polvo de la arcilla utilizado para las muestras se obtuvo preparando el suelo de forma artificial en el laboratorio, secando, triturando y tamizando el suelo obteniendo partículas de suelo ≤0.3mm de diámetro.

Este trabajo tiene como objetivo conocer y establecer la relación entre las variables de la compactación dinámica y estática, es decir, la correlación entre energía y carga, analizando el efecto que tienen estas condiciones de compactación sobre el comportamiento hidromecánico de la arcilla Boom. Para ellos se han analizado los parámetros más relevantes como permeabilidad, presión de preconsolidación, índice de compresibilidad, microestructura generada al compactar el suelo.

Se realizaron compactaciones tanto estáticas como dinámicas a la arcilla, estableciendo equivalencias asociadas a las densidades secas y humedades al compactar las muestras. A estas muestras, una vez compactadas, se les realizaron ensayos de compresión isótropa utilizando el equipo triaxiales, medida de succión y estudios de porosimetría con intrusión de mercurio (MIP).

Los resultados obtenidos de los estudios experimentales han demostrado que el tipo de compactación influye levemente en el valor de la presión de preconsolidación del suelo. Este estudio permitió verificar la influencia de las condiciones iniciales de los suelos compactados en la respuesta de éstos al ser sometidos a cambios de humedad y carga. Permitió la realización de un mapa que muestra las zonas de cambios de volumen en un plano de compactación (ρd-ω).

Los resultados aportados en esta Tesis pueden contribuir a mejorar en el conocimiento de los suelos compactados, estableciendo relaciones entre la compactación dinámica y estática.

ABSTRACT

The hydro-mechanical characteristics of compacted soils do not depend only on the type of soil, i.e. granulometry and mineralogy; the behavior of compacted soil is mainly controlled by dry density, moisture content and microstructure that is generated during the compaction process. This behavior can be characterized by its strength, deformability, permeability, among other properties, which means that for a same soil, changes in the compaction process either the energy per volume or the compaction stress or water content, or variation of any of these variables, lead to different microstructures and, therefore, to different hydro-mechanical responses of the soil.

The material used for the experimental study is the Boom Clay from Belgium. Clay powder used for the samples was artificially prepared in the laboratory, drying, crushing and sieving the soil with particles of soil ≤0. 3mm in diameter.

This work aims at establishing the relationship among the variables of dynamic and static compactions, i.e. the correlation between applied energy and stress, analyzing the effects that these compaction conditions induce on the hydro-mechanical behavior of Boom Clay. The most relevant properties such as permeability, preconsolidation pressure, compressibility, and microstructure generated during compaction of the soil, have been studied.

Both static and dynamic compactions were carried out on the clay at different dry densities and moisture contents. On these specimens, once compacted, isotropic compression tests using triaxial equipment were performed. Measurements of suction and porosimetry tests with Mercury intrusion (MIP) were also carried out.

The results of experimental studies have demonstrated that the compaction type influences the value soil preconsolidation pressure. This study allowed studying the influence of the initial conditions of the compacted soils when subjected to changes in humidity and stresses. It allowed plotting a map showing the areas of changes in volume at different compaction states (ρd-ω).

The results provided in this thesis can contribute to improve the knowledge of compacted soils by establishing relationships between dynamic and static compactions.

Contenido

AGRADECIMIENTOS i
RESUMEN iii
ABSTRACT iii
CAPÍTULO 1-INTRODUCCIÓN 1
1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 OBJETIVOS 2
CAPÍTULO 2-ESTADO DEL ARTE: ASPECTOS GENERALES SUELOS COMPACTADOS 3
2.1. INTRODUCCIÓN 3
2.2. SUELOS COMPACTADOS. VARIABLES Y PARÁMETROS 3
2.3. CURVA DE COMPACTACIÓN 4
2.3.1. RAMA SECA DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN 5
2.3.2. RAMA HÚMEDA DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN 6
2.3.3. DENSIDAD SECA MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA 6
2.4. PROCESO DE COMPACTACIÓN 6
2.5. PROPIEDADES DE LOS SUELOS COMPACTADOS 7
2.5.1. ESTRUCTURA DEL SUELO 7
2.5.2. PERMEABILIDAD 9
2.5.3. COMPRESIBILIDAD Y DEFORMABILIDAD 10
2.6. SUCCIÓN 12
2.7. APLICACIONES INGENIERILES DE LA COMPACTACIÓN 13
CAPÍTULO 3-METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y PLAN DE ENSAYOS 15
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN 15
3.1.1. ORIGEN GEOLÓGICO DEL SUELO 15
3.1.2. MINEROLOGIA 15
3.1.3. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS 16
3.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA 18
3.3. PLAN DE ENSAYOS 19
3.4. METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS 20
3.4.1. COMPACTACIÓN: ENSAYOS PREVIOS 20
3.4.2. ENSAYO CONSOLIDACIÓN ISÓTROPA 27
3.4.3. POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (MIP) 36
3.4.4. MEDIDA DE SUCCIÓN 37
CAPÍTULO 4-ANÁLISIS DE RESULTADOS 41
4.1. COMPACTACIÓN DINÁMICA 41
4.2. COMPACTACIÓN ESTÁTICA 44
4.3. MEDIDAD DE SUCCIÓN 50

4.4. PERMEABILIDAD SATURADA 52
4.5. COMPRESIBILIDAD ANTE CARGA 53
4.6. CAMBIOS VOLUMETRICOS DURANTE LA SATURACIÓN 58
4.7. RELACIÓN CARGA – ENERGÍA DE COMPACTACIÓN 60
4.8. MICROESTRUCTURA 64
CAPÍTULO 5-CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN. 69
5.1. CONCLUSIONES 69
5.2. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN 71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 73

Índice de Figuras

Figura 2.3.1. Curvas (Yd –ω) obtenidas mediante el ensayo Proctor a distinta energía de compactación (UPC, 2013). 5
Figura 2.4.1.Proceso de compactación (Grupo de Geotecnia UC, 2013). 7
Figura 2.5.1 Estructura del suelo. (Alonso et al., 1987). 8
Figura 2.5.2 Estructura alcanzada por el suelo según la rama de compactación (UPC, 2013). 9
Figura 2.5.3. (a), Relación entre la permeabilidad y la humedad; (b), densidad seca. (UPC, 2013.). 9
Figura 2.5.4 Comportamiento tenso-deformacional del suelo en función de rama de compactación (UPC, 2013). 11
Figura 3.1.1 Curva granulométrica de la arcilla Boom (Romero, 1999). 16
Figura 3.1.2 Carta de plasticidad (Romero, 1999). 18
Figura 3.2.1. Proceso preparación del material 18
Figura 3.4.1 Equipo de compactación. 20
Figura 3.4.2. Material (Arcilla Boom) 21
Figura 3.4.3. Mezcla reposando antes de compactar 21
Figura 3.4.4.Fotos superiores: material preparado; Fotos inferiores: material compactado 22
Figura 3.4.5.Equipo de compactación anillo edométrico 23
Figura 3.4.6. Anillo edométrico y muestra compactada en el anillo 23
Figura 3.4.7 Prensa de compactación estática 25
Figura 3.4.8. Molde de compactación estática. 26
Figura 3.4.9. Muestra compactada estáticamente en la prensa 27
Figura 3.4.10. Equipo triaxial automático GDS Instrumental Ltd. 28
Figura 3.4.11. Etapas de aplicación de presiones del ensayo de consolidación isótropa 30
Figura 3.4.12. Determinación de la presión de preconsolidación método de Casagrande (1936) 33
Figura 3.4.13. Determinación de la presión de preconsolidación método Pacheco Silva (1970) 34
Figura 3.4.14 Determinación de la presión de preconsolidación método Becker et al (1987). 35
Figura 3.4.15. Porosímetro Autopore IV 9500. 37
Figura 3.4.16. Psicrómetro de punto de rocío modelo WP4-T 39
Figura 4.1.1Curva de compactación Proctor normal de la arcilla Boom. 41
Figura 4.1.2.Curvas de compactación de la arcilla Boom. Ensayos con el anillo edométrico. 42
Figura 4.1.3. Curvas de compactacion obtenidas de los ensayos de Proctor normal y compactación con el anillo edométrico. 43
Figura 4.2.1. Valores de $\lambda_{\sigma v}$ y contenido de humedad de cada muestra estudiada. 45
Figura 4.2.2. Índice de poros - tensión vertical de compactación muestra CE (1.20) y resultados de Romero (1999). 45
Figura 4.2.3. Índice de poros - tensión vertical de compactación muestra CE (1.22). 46
Figura 4.2.4.Índice de poros - tensión vertical de compactación muestra CE (1.33) 46
Figura 4.2.5.Tensión vertical contra densidad seca para diferentes contenidos de humedad realizada en este estudio. 47
Figura 4.2.6. Tensión vertical contra densidad seca para diferentes contenidos de humedad incluyendo los resultados de Romero (1999). 48
Figura 4.2.7. Esquema curvas de compresión para suelo saturado y no saturado. 49
Figura 4.2.8. Valores de índice de poros y tensión media, p, durante los procesos de CE y consolidación. Muestra CE (1.22). 49
Figura 4.2.9.Valores de índice de poros y la tensión media, p, durante los procesos CE y consolidación. Muestra CE (1.33). 50
Figura 4.3.1. Valores de succión total medidos en el psicrómetro de rocío relacionadas con la humedad de las muestras compactadas. 51
Figura 4.3.2. Densidad seca - humedad con los valores de succión total obtenidos en las muestras estudiadas. 52

Figura 4.4.1. Permeabilidad saturada en función del índice de poros. 53
Figura 4.5.1. Curva de consolidación de todas las muestras ensayadas. 54
Figura 4.5.2. Curva de consolidación de las muestras compactadas dinámicamente. 55
Figura 4.5.3. Curva de consolidación de las muestras compactadas estáticamente. 56
Figura 4.5.4. Curva de consolidación de las muestras con igual densidad seca y contenido de humedad compactadas dinámica y estáticamente. 56
Figura 4.5.5Curva de consolidación de las muestras con similar densidad seca y diferente contenido de humedad, compactadas dinámica y estáticamente. 57
Figura 4.5.6. Curva de consolidación de las muestras con igual densidad seca y contenido de humedad, compactadas dinámica y estáticamente. 57
Figura 4.5.7. Curva de consolidación de las muestras con diferentes densidad seca e igual contenido de humedad, compactadas dinámica y estáticamente. 58
Figura 4.6.1. Plano densidad seca y contenido de humedad de las muestras estudiadas. 59
Figura 4.6.2. Densidad seca inicial en función de la tensión vertical (Romero, 1999). 60
Figura 4.7.1. Relación energía -tensión de compactación. 61
Figura 4.7.2. Cuevas de compactación estática para diferentes niveles de tensión y curvas de compactación dinámica para PN y PM. 62
Figura 4.7.3. Superficie de fluencia en espacio de tensiones (p, s) de las compactaciones dinámicas y estáticas. 63
Figura 4.8.1. Porosidad por intrusión acumulad. Muestras compactadas dinámicamente. 65
Figura 4.8.2. Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas dinámicamente. 65
Figura 4.8.3. Porosidad por intrusión acumulada muestras compactadas estáticamente. 66
Figura 4.8.4. Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas estáticamente. 66
Figura 4.8.5. Porosidad por intrusión acumulada muestras de compactadas de forma dinámica y estática a la densidad seca de 1.22 gr/cm^3. 67
Figura 4.8.6. Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas estática y dinámica a densidad seca de 1.22 gr/cm^3. 67
Figura 4.8.7Porosidad por intrusión acumulada muestras de compactadas de forma dinámica y estática de densidad seca 1.33 gr/cm^3. 68
Figura 4.8.8. . Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas estática y dinámica a densidad seca de 1.33 gr/cm3. 68

Índice de tablas

Tabla 2.7.1Relación entre método de aporte de energía compactación; Ensayos en laboratorio y sistema usado in situ (UPC, 2013). 13
Tabla 3.4.1. Formato típico de un archivo de datos de salida de un ensayo triaxial. 30
Tabla 3.4.2. Esquema de las variables a calcular a través del proceso de los datos de la tabla 3..31
Tabla 4.1.1.Resultados de los ensayos de compactación con el anillo edométrico. 42
Tabla 4.2.1. Características de las muestras compactadas estáticamente. 44
Tabla 4.2.2. Resumen valores de e_0 y λ para cada muestra compactada 44
Tabla 4.3.1. Valores obtenidos de las medidas de succión de las muestras compactadas. 50
Tabla 4.4.1. Resumen de los valores de las permeabilidades de las muestra ensayadas. 53
Tabla 4.5.1. Resumen de las condiciones iniciales, saturadas y finales de las muestras sometidas a consolidación. 54
Tabla 4.5.2. Resumen los valores de presión de pre consolidación de las muestras ensayadas. ..58
Tabla 4.6.1. Resumen de los cambios de volumen de las muestras durante la etapa de saturación bajo presión isotrópica constante de 30 kPa. 59
Tabla 4.7.1. Resumen de las tensiones equivalentes a la energía de PN y PM para cada muestra. 61
Tabla 4.7.2. Parámetros y resultados de las curvas LC. 63
Tabla 4.8.1. Resumen de los resultados de las pruebas MIP 68

CAPÍTULO 1-INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El suelo constituye un recurso esencial para el desarrollo socio-económico de las sociedades, y el uso del mismo como escenario para la construcción de obras es una práctica que se realiza desde hace miles de años, por lo que conocer y entender su comportamiento hidromecánico es esencial para los diseños y construcción de las estructuras.

In-situ, existen casos en los que es necesario mejorar las características mecánicas del suelo, como aumentar su capacidad portante, disminuir su permeabilidad o deformabilidad. Para ello, se emplean métodos con el fin de conseguir lo que en la geotecnia se conoce como "Mejora del Terreno". Uno de estos métodos es la compactación de suelos, que podemos definir como el proceso de densificación del suelo a través de medios mecánicos, mediante el que se obliga al suelo a expulsar el aire contenido en los poros consiguiendo que las partículas se reacomoden generando una disminución en los poros, y por ende, que la estructura del suelo sea más densa.

Por lo general, debido a su repetitividad y comodidad, los estudios sobre el comportamiento de los suelos en el laboratorio se realizan sobre probetas compactadas estáticamente, imponiendo una humedad y comprimiendo la muestra a baja velocidad hasta una determinada carga, volumen o densidad. En los suelos compactados dinámicamente, se aporta una energía de compactación con velocidades altas mediante un pisón de masa normalizada en caída libre, lo que hace más difícil obtener una densidad prefijada.

Ciertamente en el estudio de los suelos compactados se ha analizado de la influencia del contenido de humedad y la densidad seca en el comportamiento mecánico de los suelos compactados, correspondiente a una energía de compactación específica, así como también la microestructura que se genera durante el proceso de compactación del suelo. Sin embargo, es poco conocida la relación entre las variables de la compactación estática y dinámica y la analogía entre las propiedades como la permeabilidad, rigidez, presión de preconsolidación, etc.

1.2 OBJETIVOS

El propósito general de esta Tesis de Máster es realizar un estudio y comparación experimental del comportamiento hidromecánico de una arcilla compactada dinámica y estáticamente, estableciendo la relación entre las variables estáticas y dinámicas y su influencia en las características hidromecánicas obtenidas en el suelo compactado.

Para lograr el objetivo general antes planteado, se establecen la siguiente metodología de estudio y objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica
- Familiarización con equipos de laboratorio.
- Realización de ensayos de compactación dinámica (Proctor) y estática.
- Realización de medidas de porosimetría y succión.
- Análisis de resultados.
    - Obtención de la curva de compactación humedad-densidad seca del material en estudio (Arcilla Boom), realizando ensayo de PN.
    - Relación de las variables humedad-densidad seca en la compactación dinámica entre el PN en molde normalizado y compactación en el anillo edométrico.
    - Determinar relaciones experimentales entre el comportamiento hidromecánico del suelo y las condiciones de compactación.
    - Determinar la presión de preconsolodación del material, compactado estática y dinámicamente utilizando diferentes métodos.
    - Comparara los análisis de porosimetría a la arcilla Boom compactada estática y dinámicamente.
    - Comparar la succión del material compactado tanto estática como dinámicamente.
    - Comparar los resultados de los ensayos y estudios realizados a la muestra compactada dinámica y estáticamente.

CAPÍTULO 2-ESTADO DEL ARTE: ASPECTOS GENERALES SUELOS COMPACTADOS

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta un resumen acerca el conocimiento de la compactación estática y dinámica de suelos. Se hará una breve descripción de las características y variables más relevantes en la interacción suelo-agua.

2.2. SUELOS COMPACTADOS. VARIABLES Y PARÁMETROS.

El proceso de compactación tiene como propósito fundamental modificar las condiciones del suelo que se compacta, mediante una aplicación de energía externa que lleva a la reducción del índice de poros, disminuyendo la deformabilidad y permeabilidad del suelo, aumentando así su rigidez y resistencia. Esto es, con la finalidad de obtener un material capaz de presentar un comportamiento adecuado para la función específica que se requiera.

El estudio sistemático del proceso de compactación y las propiedades resultantes de los suelos compactados, inició en California a mediados de 1930 con la publicación de R.R. Proctor con el fin de caracterizar el comportamiento del suelo frente al proceso de compactación. Proctor propuso como variables para caracterizar el proceso de compactación: la densidad seca alcanzada, la humedad de compactación empleada, la energía aportada al suelo y, por supuesto el tipo de suelo (Gómez, 2013).

Actualmente el ensayo se encuentra normalizado con algunas variantes en referencia a la energía de compactación; Proctor Normal (PN), que aplica al suelo una energía de 583 kJ/m^3 y Proctor Modificado (PM), que aplica al suelo una energía de 2.630 kJ/m^3. Estos ensayos permiten obtener resultados reproducibles que ofrecen la posibilidad de ser referencia en el control de densificación en las obras. Los equipos utilizados en el laboratorio para el PN y para el PM son distintos; su proceder experimental está recogido en normas diferentes tanto española como americana respectivamente (para el PN se utiliza la norma UNE-103500-94 / ASTM D-698-07 y para el PM la UNE-103501-94/ ASTM D-1557.

La compactación modifica las propiedades originales del suelo, produce cambios en la estructura interna del mismo, teniendo así deformaciones permanentes, donde esta estructura adquirida por el suelo compactado junto a la humedad y la densidad seca serán los que rijan el comportamiento hidromecánico del mismo.

Los factores que influyen en la estructura del suelo generada como resultado de la compactación se pueden clasificar en internos y externos. Los factores implican la mineralogía, forma y tamaño de sus partículas, y la química del agua que ocupa los poros. Los factores externos se refiere al método y la energía o presión de compactación usados, los cuales modifican la estructura original (González, 2012).

2.3. CURVA DE COMPACTACIÓN

Cuando se pretende diseñar una determinada estructura geotécnica, en la que se requiera compactación del terreno, es esencial determinar las características de la compactación en vistas a que el terreno pueda soportar las solicitaciones mecánicas que se apliquen sobre él. El ensayo Proctor permite obtener la densidad seca que puede alcanzar un suelo para un nivel de energía prefijado. De este modo, para un determinado tipo de suelo, si se fija el nivel de energía se puede obtener la curva de compactación (γ_d-ω) que contiene una información muy útil en vistas a compactar el terreno con la mayor eficacia posible (UPC, 2013).

-Densidad y humedad en los suelos compactados

Tal como se ha indicado, el resultado del proceso de compactación, para una cantidad de energía dada, se muestra en un plano de compactación o curva de compactación (γ_d –ω), como muestra la Figura 2.3.1 en la que se puede observar que existe un contenido de humedad óptimo (ω_{opt}), asociado a un valor máximo de la densidad seca (γ_{dmax}). Cada punto en el gráfico (γ_d –ω) corresponde a un ensayo Proctor, los valores de la curva que representan menores contenidos de humedad que el óptimo se conoce como "rama seca" y los valores mayores al óptimo como "rama húmeda". La curva grado de saturación igual a la unidad representa un límite para la curva de compactación, dado que no es posible alcanzar grados de saturación mayores que la unidad. En los suelos reales, la humedad óptima es inferior al límite plástico (UPC, 2013).

-Energía de compactación

Cabe señalar que si es aumentada la energía aplicada, la curva de compactación se desplaza hacia la izquierda, es decir, hacia valores crecientes de la densidad seca; La Figura 2.3.1 muestra los resultados de dos curvas de compactación para un mismo suelo en el que se han usado distintas energía de compactación. El límite extremo para la compactación, la máxima densidad seca posible, se da cuando γd = γs, ello supondría un índice de poros nulo.

La curva que presenta mayor densidad seca corresponde a la que se ha obtenido con una energía de compactación mayor y, por tanto, la humedad óptima resultante debe ser menor (UPC, 2013).

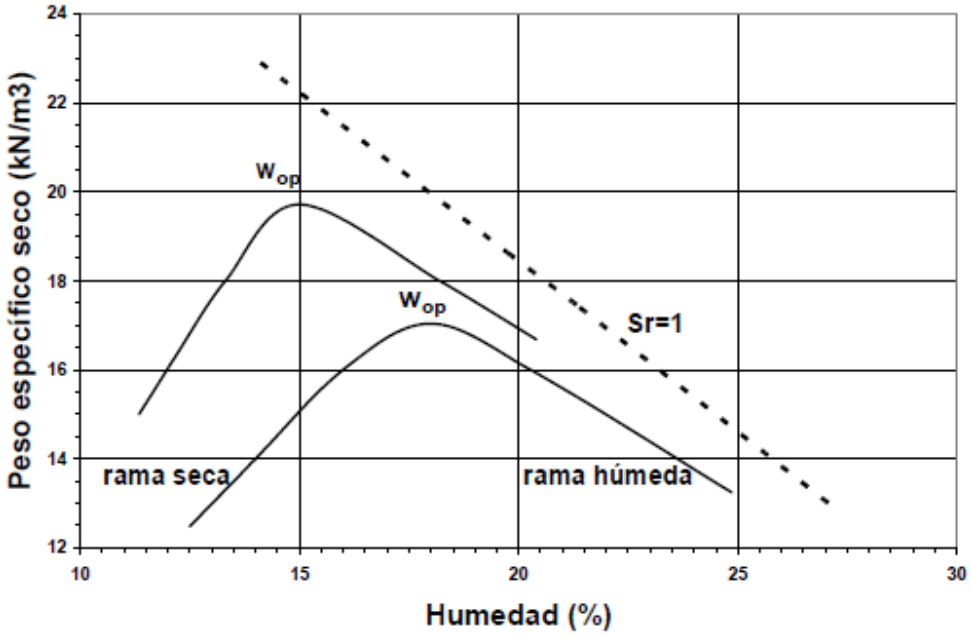


Figura 2.3.1. Curvas (Yd –ω) obtenidas mediante el ensayo Proctor a distinta energía de compactación (UPC, 2013).

-Grado de saturación

Experimentalmente se puede verificar que el grado de saturación de los suelos correspondiente a la humedad óptima se encuentra en valores de un Sr del orden de 0.7 a 0.8 para los suelos granulares graduados y de Sr alrededor de 0.85 en los suelos cohesivos y algo mayor para los suelos netamente arcillosos.

El grado de saturación del suelo en función de su humedad y densidad seca se puede obtener mediante la expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+\frac{\gamma_s \omega}{\gamma_\omega S_r}} \rightarrow S_r = \frac{\omega}{\frac{\gamma_\omega}{\gamma_d} - \frac{\gamma_\omega}{\gamma_s}} \qquad (2.3.1)$$

2.3.1. RAMA SECA DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN

Previo a comenzar a desarrollarse la rama seca de la curva de compactación, el suelo se encuentra con un contenido muy bajo de humedad, que corresponde al agua adsorbida, y en este estado se considera que el suelo está seco. El suelo debe superar ese origen de humedad, para que el agua tome el rol de lubricante entre partículas. Hasta que ello no

ocurra, la fricción entre los granos impide el deslizamiento de unas partículas sobre las otras, y por consiguiente, impide que se densifique. En el comienzo de la rama seca, la permeabilidad al aire es alta y va decreciendo a medida que se aproxima al punto de máxima densidad (Páramo, 2002).

2.3.2. RAMA HÚMEDA DE LA CURVA DE COMPACTACIÓN

La zona húmeda comienza en el punto de máxima densidad de la curva. En él se dan las condiciones para que una proporción del aire pase al estado ocluido. En esta condición el aire se comporta como un material perfectamente elástico, lo que asociado al incremento de humedad se traduce en una separación de las partículas con una disminución de la densidad seca (Páramo, 2002).

2.3.3. DENSIDAD SECA MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA

Al compactar bajo una humedad determinada, el suelo aumenta su densidad seca. Esta densidad seca no es infinita, sino, que tiene un límite ($\rho_{d,max}$) que corresponde a la total expulsión de aire de la los poros del suelo. En este estado, el suelo estaría totalmente saturado (Sr=1) ya que el volumen de aire seria cero ($V_{af} = 0$). Ciertamente este límite es inalcanzable y en realidad sólo se puede llegar a una densidad máxima un poco inferior. En el proceso de compactación, la reducción de porosidad junto al incremento de la humedad llevan a dicho estado límite, en el que más allá de cierto contenido de humedad el agua comienza a tener una continuidad que cierra los poros comunicados, como consecuencia, el aire queda encerrado en forma de burbujas aisladas, que son retenidas en cada poro y no es posible conseguir una mayor densificación en el suelo para un mismo trabajo mecánico. (Grupo de Geotecnia UC, 2013; Páramo, 2002)

2.4. PROCESO DE COMPACTACIÓN

En la Figura 2.4.1 se inicia el proceso de disminución de volumen de un elemento de suelo debido a la presión que le ejerce un compactador actuando rápidamente. Durante el proceso, permanecen fijos el volumen de sólidos (V_s) y el de agua (V_w), por lo que la posibilidad de compresión en el suelo será debido a la disminución de volumen del aire de V_{ai} a V_{af}.

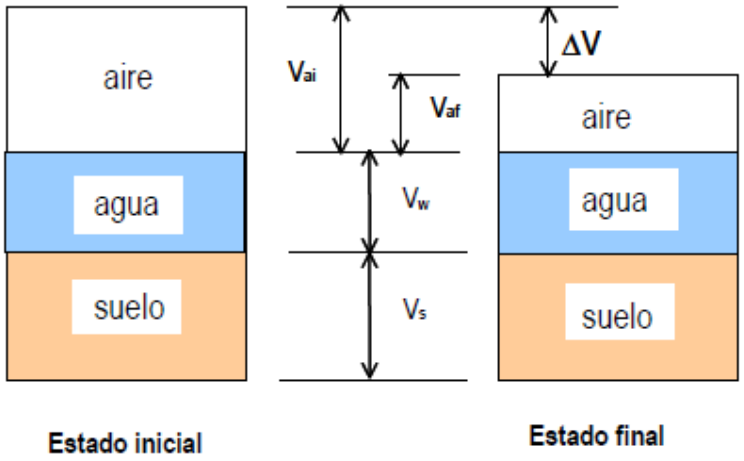


Figura 2.4.1.Proceso de compactación (Grupo de Geotecnia UC, 2013).

La disminución del volumen de aire puede ser debido a compresión del aire, disolución de aire en agua o expulsión de aire. Las dos primeras componentes son reversibles, y se recuperan una vez que deja de actuar la fuerza de compresión, mientras que la última, debido a la expulsión de aire, exige lógicamente que la estructura de las partículas del suelo se acomode al nuevo volumen de huecos, lo que produce un cambio permanente. (Grupo de Geotecnia UC, 2013).

2.5. PROPIEDADES DE LOS SUELOS COMPACTADOS

Como hemos mencionado al inicio del capítulo, el objetivo de la compactación es obtener un suelo con característica geotécnicas determinadas capaces de presentar un comportamiento adecuado a la función que se demande. Entre las propiedades del suelo que se ven afectadas por las condiciones de compactación están la permeabilidad, compresibilidad, resistencia, deformabilidad frente a inundación, la estructura alcanzada y presiones de agua en el suelo compactado.

2.5.1. ESTRUCTURA DEL SUELO

En la actualidad, se considera que la microestructura de un suelo compactado, está determinada por tres tipos de elementos que son: *partículas elementales*, *agregados de partículas*, y *poros* (Alonso et al., (1987). A partir Estos elementos se pueden establecer tres tipos de estructuras fundamentales (Ver Figura 2.5.1): cuando las partículas elementales están distribuidas de forma homogénea, se considera una estructura de tipo matricial; cuando las partículas elementales están agrupadas como si fueran un grano de tamaño mayor, se dice que hay una microestructura de agregados; y una microestructura de granos de arenas y/o limos con conectores de arcilla entre los

granos, o contactos directamente, sin conectores de partículas de arcilla (Barrera & Garnica, 2002).

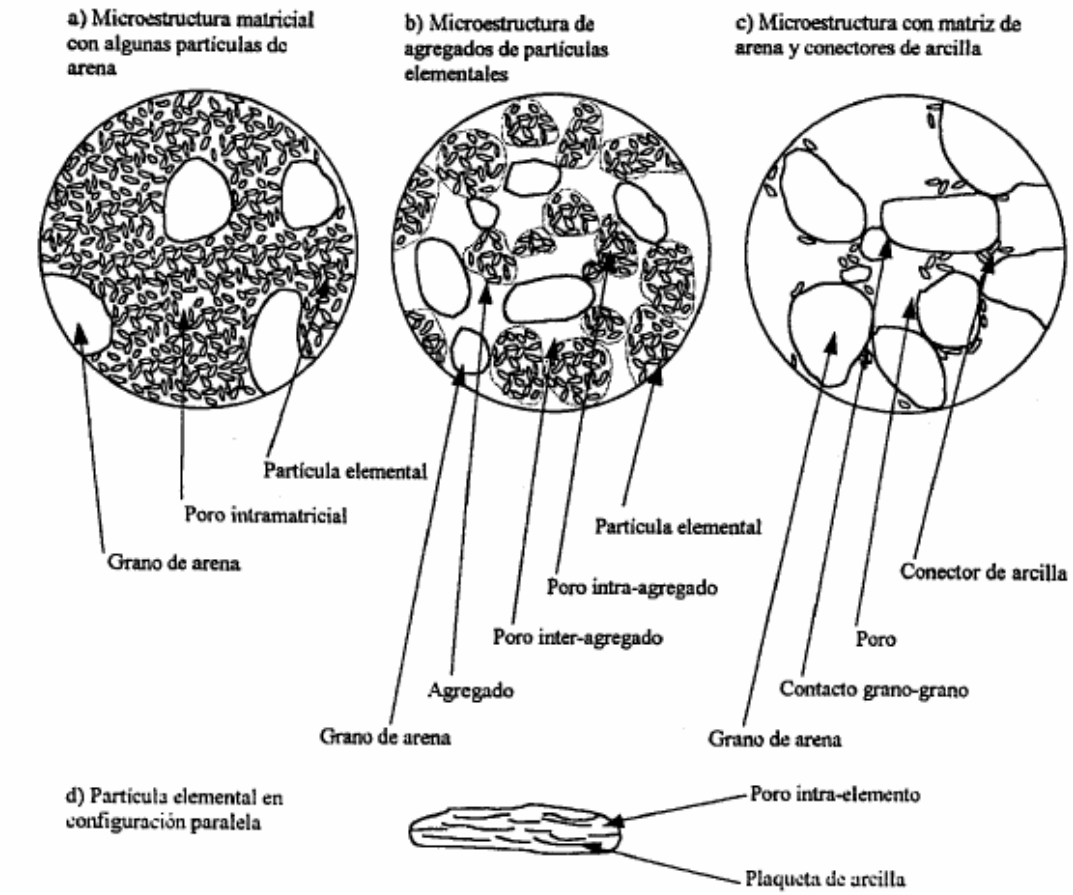


Figura 2.5.1 Estructura del suelo. (Alonso et al., 1987).

La *estructura alcanzada* por el suelo compactado dependerá de la humedad de compactación, es decir, si se compacta por la rama seca o rama húmeda. Si se compacta por la rama seca $(\omega < \omega_{opt})$, generalmente, la estructura que alcanzan estos suelos es floculada; Si se compacta por la rama húmeda $(\omega > \omega_{opt})$, la estructura del suelo que habitualmente se obtiene es la estructura dispersa.

Los suelos que alcanzan una estructura floculada son menos deformables, presentan una mayor succión y una mayor rigidez que los que alcanzan una estructura dispersa, debido a que generalmente en la rama húmeda el grado de saturación suele ser mayor de 0.8, la succión generada es muy baja y, por tanto, su influencia sobre la resistencia y la rigidez es pequeña. En la Figura 2.5.2 se muestra un ejemplo de una curva de compactación en la que se indica la estructura alcanzada en función a la rama por la que sea compactado el suelo (UPC, 2013).

La estructura interna que presentan los suelos es un parámetro de gran relevancia en el comportamiento deformacional de los mismos. Así, por ejemplo bajo las mismas

condiciones de carga, para un suelo con una estructura abierta se produce un colapso durante el humedecimiento del suelo, sin embargo, para el mismo suelo y en mismas condiciones de carga, pero con una estructura más compacta se puede producir un hinchamiento al humedecerlo (Barrera & Garnica, 2002).

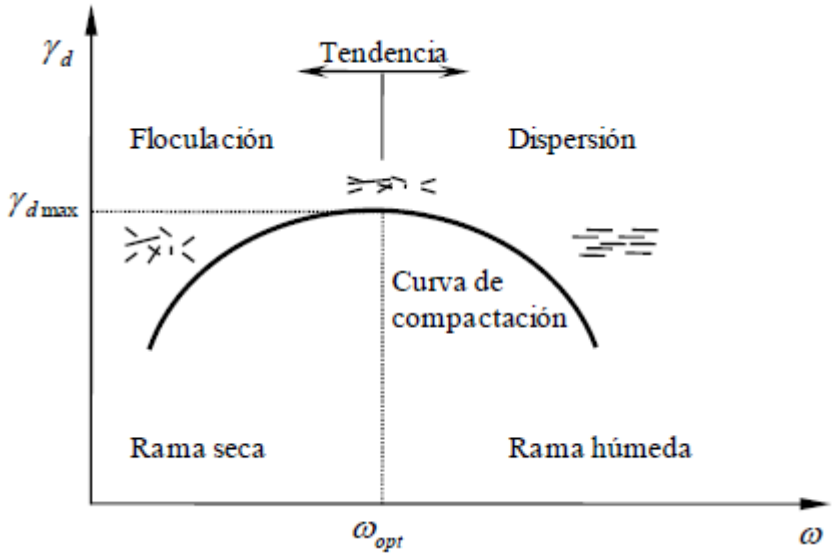
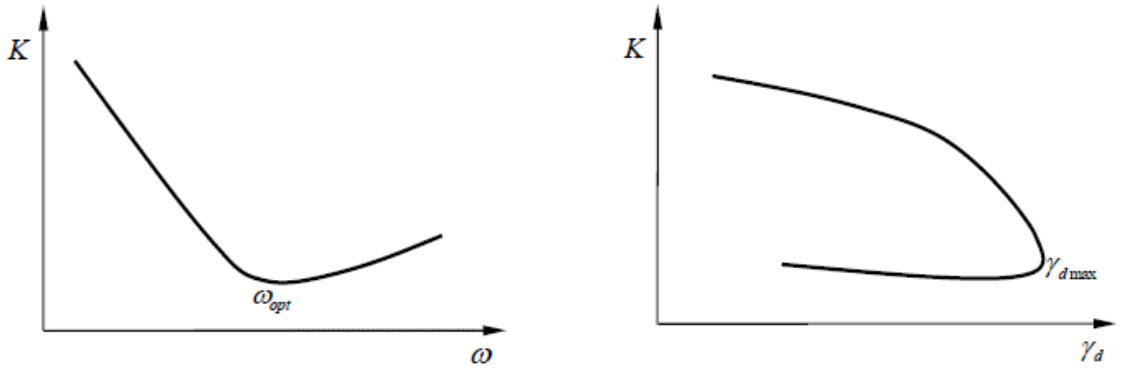


Figura 2.5.2 Estructura alcanzada por el suelo según la rama de compactación (UPC, 2013).

2.5.2. PERMEABILIDAD

En lo referente a la *permeabilidad* de los suelos compactados, la Figura 2.5.3 muestra un ejemplo de dos gráficos en función de la permeabilidad k (k-ω) y (k-Y_d), que se pueden obtener experimentalmente. En ambos gráficos se observa que si se compacta el suelo con una energía constante en la rama seca la permeabilidad desciende hasta un valor k_{min}, cercano al valor de la ω_{opt} o bien a la $Y_{d,max}$ (UPC, 2013).



(a) (b)

Figura 2.5.3. (a), Relación entre la permeabilidad y la humedad; (b), densidad seca. (UPC, 2013.).

Por otro lado, en el grafico (a) se observa que si aumenta la humedad progresivamente, al alcanzar la rama húmeda el valor de la permeabilidad aumenta ligeramente. Ciertamente, si se repite el ensayo aumentando la energía de compactación, el suelo se comprimirá más disminuyendo así su índice de poros y, por lo tanto, disminuirá la permeabilidad. Efectivamente, la permeabilidad es función del índice de poros, del grado de saturación, de la estructura alcanzada y del diámetro equivalente mayoritario de los poros (UPC, 2013).

2.5.3. COMPRESIBILIDAD Y DEFORMABILIDAD

La *compresibilidad* de suelos compactados se define por la mayor o menor deformación que el suelo presenta frente a la acción de una carga exterior. Esto dependerá de la estructura alcanzada durante el proceso se compactación, siendo que los suelos que consiguen estructura floculada (rama seca) son pocos compresible, mientras que los suelos que adquieren estructura dispersa (rama húmeda) son muy compresibles (UPC, 2013).

La *deformabilidad o cambios de volumen* que puede sufrir un suelo compactado al ser saturado bajo la acción de una carga externa de valor constante, se asocian a los fenómenos de hinchamiento, colapso y retracción. Este comportamiento está en función de la estructura de suelo. Es de gran importancia conocer estas deformaciones (cambios de volumen) que los suelos compactados pueden sufrir bajo las estructuras al variar su humedad.

En relación a estos cambios de humedad, se han observado que muestras compactadas del lado seco, debido a una estructura inicial abierta (floculada), presentan comportamientos de colapso al ser saturadas, o de hinchamiento si inicialmente presentan una estructura muy compacta. Sin embargo, las muestras compactadas del lado húmedo prácticamente no muestran cambios de volumen luego de saturarlas (Lawton *et al.*, 1989).

-Hinchamiento

El hinchamiento, se refiere al aumento de volumen que sufre el suelo al ser saturado manteniendo una carga aplicada de valor constante. Este aumento de volumen tiene una componente debida a la relajación de los esfuerzos intergranulares al aumentar el grado de saturación. El hinchamiento suele darse en los suelos arcillosos plásticos, si han sido compactados en la rama seca a densidad elevada (energía de compactación elevada). También depende del tipo de partículas que lo componen, las partículas de gran superficie especifica tiene elevado potencial de hinchamiento en especial los que contienen minerales como la montmorillonita y la illita. En suelos limosos la tendencia al hinchamiento suele ser pequeña.

-Colapso

El colapso es uno de los fenómenos más característicos de los duelos parcialmente saturados sobre todo en aquellos que poseen una estructura abierta; suele presentarse en suelos de tipo limoso que han sido compactados por la rama seca a baja densidad seca. Ciertamente en esta zona de compactación el índice de poros es elevado, al igual que el valor de la succión, por lo que inicialmente, las partículas se encuentran en equilibrio mediante la tensión capilar. En efecto, al saturarse el suelo (debido a cambios ambientales u otro tipo), se da un descenso notable de la resistencia del suelo y, en consecuencia, tiene lugar un reacomodo de las partículas que pasan a ocupar los poros de aire, el esqueleto sólido tiende a desmoronarse produciéndose así reducciones volumétricas irrecuperables sin que se varíe la carga externa aplicada.

-Retracción

La retracción del suelo se produce por disminución del contenido de agua en un suelo que tiene un grado de saturación inicial elevado. Este fenómeno se puede observar en los procesos de secado en los que el suelo tiende a agrietarse. Habitualmente se da en suelos compactados en la rama húmeda y no en suelos compactados por la rama seca (UPC, 2013).

La *resistencia* que presentan los suelos compactados por la rama seca es mayor que los la de los suelos compactados por la rama húmeda, sin embargo, en el caso de producirse rotura, es del tipo frágil. En los suelos compactados por la rama húmeda presentan una rotura de tipo plástico. La Figura 2.5.4 muestra un comportamiento tenso-deformacional comparado entre el suelo compactado por la rama seca y el mismo suelo compactado por la rama húmeda.

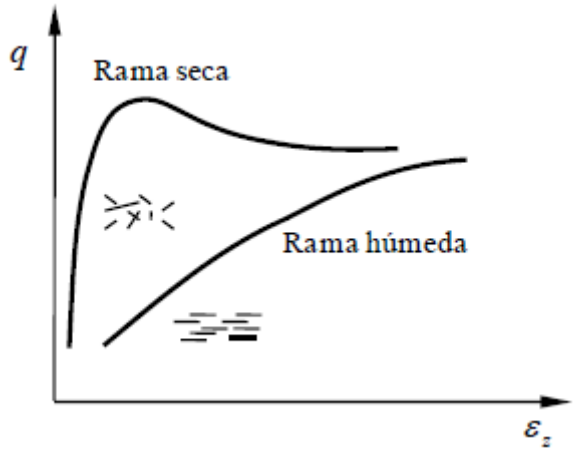


Figura 2.5.4 Comportamiento tenso-deformacional del suelo en función de rama de compactación (UPC, 2013).

El aumento de la *Presión intersticial* que puede generarse en el terreno debido a la compactación dependerá según la rama en la que se compacte. Si se compacta el por la rama seca, es decir, un grado de saturación bajo, se conseguirá una permeabilidad

relativamente alta y las presiones de agua generadas serán bajas, dado que la elevada permeabilidad permite que la presión intersticial se disipe con rapidez. Por el contrario, si se compacta el suelo por la rama húmeda, esto es, un grado de saturación elevado, se conseguirá una permeabilidad baja y las presiones de agua generadas se disiparán con dificultad. Por otro lado, pueden producirse oclusiones de aire con lo que puede aumentar su presión y transmitirla al agua.

2.6. SUCCIÓN

El término succión o potencial de agua, designa a la componente del estado de esfuerzo que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin su participación resulta difícil entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado. El efecto de la succión en un suelo parcialmente saturado es equivalente al de una presión exterior aplicada. Esta succión se puede considerar compuesta por dos componentes:

$$\Psi = s_m + s_o \quad (2.6.1)$$

Donde, s_m, o succión matricial, es la presión negativa de agua intersticial, esta succión está directamente relacionada con el estado de esfuerzo procedente de los fenómenos de superficie y gravitatorios; s_o, o succión osmótica, es la presión negativa de agua pura a la que habría que someter a una masa de agua para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable (Barrera & Garnica, 2002).

La succión estará, en directa relación con la mayor o menor tendencia del suelo a absorber agua. Para un mismo índice de poros y en procesos monótonos, cuanto mayor o menor sea la humedad o el grado de saturación, menor o mayor será la succión.

Diversos autores han estudiado experimentalmente el efecto que tiene cada una de las componentes de la succión, tanto la succión osmótica como la succión matricial, sobre el comportamiento del suelo. Ciertamente es reconocida la influencia de la succión matricial sobre la respuesta deformacional y mecánica del suelo, sin embargo, no existe evidencia clara sobre el efecto de la succión osmótica.

Alonso *et al.* (1987), analizando el comportamiento deformacional del suelo parcialmente saturado con relación a cambio de succión, señalan que un aumento de la succión contribuye a un incremento de la rigidez y del grado de sobreconsolidación del suelo ya que interviene en las uniones entre partículas incrementando las fuerzas que las mantienen unidas. Los suelos arcillosos compresibles experimentan cambios en su índice de vacíos como consecuencia de los cambios en la succión.

2.7. APLICACIONES INGENIERILES DE LA COMPACTACIÓN

Relación compactación ensayos laboratorio y compactación in-situ:

Existen diversos métodos de compactación de suelos *in situ* según las necesidades del terreno y de la obra. En la Tabla 2.7.1 (UPC, 2013), se muestra un cuadro resumen comparativo entre los métodos de compactación usados en el laboratorio y su correspondencia con los empleados *in situ*.

Tabla 2.7.1Relación entre método de aporte de energía compactación; Ensayos en laboratorio y sistema usado in situ (UPC, 2013).

Método de aporte de energía	Laboratorio	In-situ
Impacto	Proctor	Caída de pesos
Amasado	Harvard	Rodillo con salientes
Vibración	Mesa vibrante	Rodillo vibrante
Compresión	Prensado	Rodillo liso pesado
Explosión	-	Explosión controlada

Los métodos más utilizados para el aporte de energía al terreno son los de vibración, compresión y amasado. El método de impacto para la compactación *in situ* es poco utilizado, sin embargo es muy apropiado para conseguir una densidad elevada en un punto localizado, para ello debe disponerse de una masa elevada, de varias toneladas, que se eleva mediante una grúa apropiada y se deja caer libremente sobre el mismo punto hasta alcanzar la densidad requerida. En cuanto al método por explosión, es poco utilizado dado que, produce fuertes vibraciones en el terreno inadmisibles en una zona habitada y pueden afectar a las construcciones existentes en su proximidad (UPC, 2013).

CAPÍTULO 3-METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y PLAN DE ENSAYOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO UTILIZADO EN LA INVESTIGACIÓN

Los valores, datos y parámetros de caracterización de la arcilla Boom, fueron tomados de la tesis doctoral "*Characterisation and Thermo-Hydro-Mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study*" (Romero 1999).

3.1.1. ORIGEN GEOLÓGICO DEL SUELO

El suelo usado en los experimentos fue la arcilla Boom, el cual fue preparado artificialmente a partir de arcilla de Boom natural obtenida en la ubicación 223 m por debajo de la superficie en el laboratorio subterráneo HADES (SCK·CEN repositorio experimental) en Mol en Bélgica. La arcilla de Boom es un polvo de color grisáceo a una humedad higroscópica de aproximadamente 3%.

La formación terciaria de la arcilla de Boom es la más joven de una secuencia de sedimentos marinos, que se depositaron en el norte de Europa sobre Bélgica y toda la zona en alta mar de los Países Bajos durante el Oligoceno Medio, hace 30 millones de años (Horseman et al., 1987). Las arcillas se formaron en profundidades de menos de 150 m (Letsch y Sissingh, 1983 en Schokking y Nooy van der Kolff, 1995) con un espesor promedio asumido de esta secuencia de aproximadamente 100 m. Al final del Oligoceno se produjo una elevación importante causando la erosión de los últimos depósitos y la arcilla de Boom en grandes áreas. Siguiendo la secuencia de arcilla de Boom a finales del Oligoceno, Mioceno y Plioceno se establece una cubierta de depósitos aproximadamente en la misma área de ocurrencia de arcilla, en donde ésta se encuentra a aproximadamente 160 m por debajo de la superficie bajo la formación arenosa en Amberes, con un espesor de aproximadamente 110 m (Heremans, 1980 en Horseman et al., 1987).

3.1.2. MINEROLOGIA

La mineralogía de arcilla para las distintas muestras difiere considerablemente de un informe a otro. Estas variaciones parecen deberse a diferencias litológicas y estratigráficas de las distintas unidades geotécnicas identificadas para la formación de arcilla Boom. No obstante, parece que la composición dominante de la fracción de arcilla, lo que representa 65% a 70% del peso total de los sólidos, es el grupo de la caolinita / mica (caolinita / minerales illita con 27% a 48% del peso total de los sólidos).

La caracterización analítica del polvo de arcilla de Boom obtenida a través del método de fluorescencia de rayos X incluye los siguientes componentes identificados (% en peso seco; Robinet et al, 1996b.): SiO_2 (57,58%), Al_2O_3 (12,93%), Fe_2O_3 (7,57 %), CaO (2,22%), MgO (2,40%), Na_2O (0,12%), K_2O (1,96%), MnO (0,01%), TiO_2 (0,88%), P_2O_5 (0,18%).

3.1.3. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Granulometría

La Figura 3.1.1 muestra el resultado de la distribución del tamaño de partícula de arcilla Boom en comparación con la obtenida a partir de diferentes estudios utilizando técnicas convencionales (Baldi et al, 1988; Lagny, 1996; Wan, 1996) y granulometría láser (Rhattas, 1994; Lagny, 1996). En general, se puede observar que la arcilla está bien graduada con un Cu = D_{60} / D_{10} ≈7, lo que indica que la distribución del tamaño de grano se extiende sobre una amplia gama. El tamaño efectivo de las partículas es ≈ D_{10} ≈1 µm para partículas floculadas predominantemente y alrededor de 100 nm para los estados predominantemente dispersas. El contenido de arcilla de tamaño (<2 µm) varió entre (22 ± 4) % para las partículas aparentemente floculados y (54 ± 5) % para los estados dispersos.

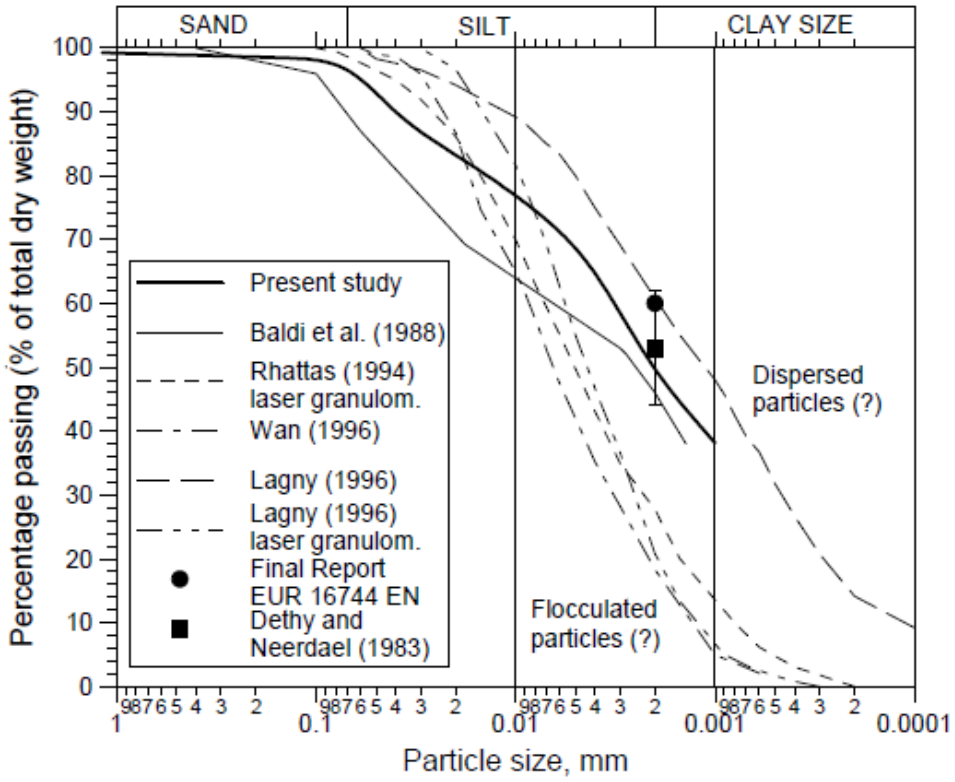


Figura 3.1.1 Curva granulométrica de la arcilla Boom (Romero, 1999).

La gravedad especifica de las partículas del suelo es de Gs = 2.70, determinado según la norma ASTM D854 (Romero, 1999).

Superficie Específica Ss

La superficie específica S_S para el polvo de arcilla Boom fue calculado usando porosimetría de intrusión de mercurio. Los valores de la Ss variaron entre 18,7 m2 / g para una γd = 13,7 kN/m3 (1.40 g/cm^3) (Romero, 1999).

Límite de consistencia

Los límites de consistencia también fueron investigados para el polvo de arcilla remoldeado siguiendo la norma ASTM D4318. Los valore del límite líquido y el índice de plasticidad fueron de W_l= (55,7 ± 0,9) % y el PI = (26.9 ± 1.0) %, respectivamente. La Figura 3.2.1 muestra (Romero, 1999) el gráfico de plasticidad, que incluye los resultados de consistencia reportados por diferentes estudios. En general, entre los diferentes estados reconstituidos obtenidos en el laboratorio se puede ver una gran dispersión de los resultados, que se cree que es debida a la influencia de los cambios en la estructura de remoldeado (dispersa y estados floculadas), así como el efecto de los cationes intercambiables (sustitución de cationes divalentes por cationes monovalentes) y concentraciones de sal sobre las fuerzas entre partículas, que tienen un papel destacado en la determinación del límite líquido (Yong y Warkentin, 1975; ASTM D4318). De acuerdo a la Figura 3.1.2, la arcilla Boom puede ser clasificada como una arcilla plástica media-alta inorgánica (CH) (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, ASTM D2487).

El polvo de arcilla de Boom desestructurada tiene una unidad de peso seco estimado de 10,8 kN / m^3 (1.102 g/cm^3), e = 1,459. La humedad higroscópica a una humedad relativa de laboratorio de 47% (que corresponde a un total de succión ψ ≈ 102 MPa) es de alrededor de 3,0%.

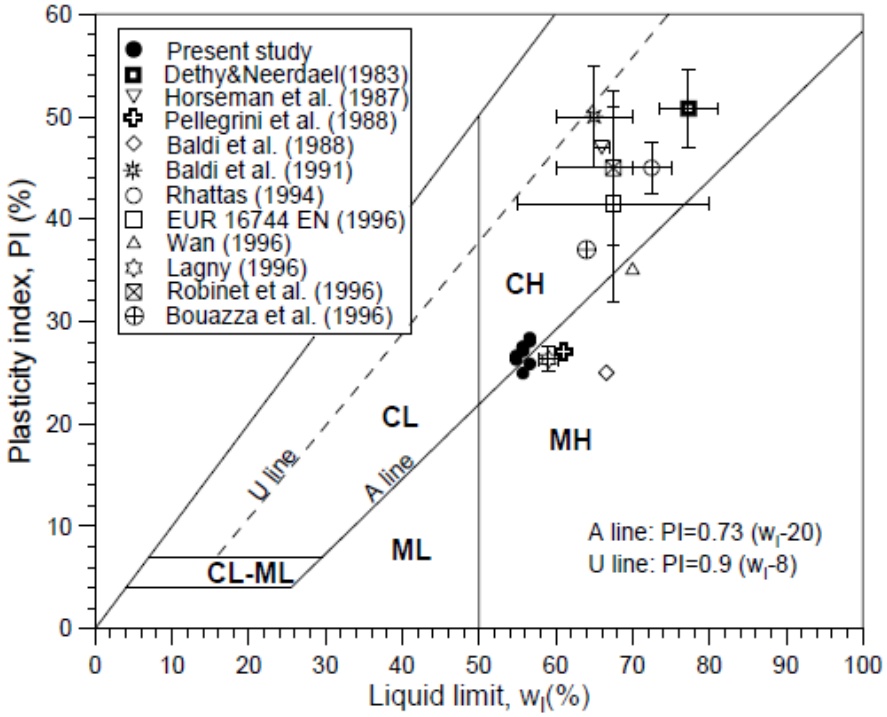


Figura 3.1.2 Carta de plasticidad (Romero, 1999).

3.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

El suelo proporcionado para realizar los ensayos de la campaña experimental, será la arcilla Boom. El material no se encontraba en estado natural, si no en condiciones alteradas y saturadas (muestras ya ensayadas en estudios anteriores). Para obtener el suelo en las condiciones deseadas, antes de realizar los ensayos, el suelo fue artificialmente preparado, es decir, secado en el horno por un promedio de dos días a una temperatura de 105°C ± 5°C, machacado y triturado mecánicamente, y pasado por el tamiz No.89 de la ASTM con una abertura de 0.3mm (Figura 3.2.1).

a) Secado en el horno *b) Machacado y tamizado* *c) Suelo tamizado*

Figura 3.2.1. Proceso preparación del material

Luego de obtenido el suelo (arcilla) pasante por el tamiz No. 89 ASTM (0.30mm), y que éste se deja al aire bajo las condiciones ambientes del laboratorio (2 días aproximadamente) se consiguió la humedad higroscópica (w_h) del material con un valor de 2.7%.

Para el estudio se realizaron compactaciones tanto dinámicas como estáticas al suelo. La dimensiones de las muestras compactadas a estudiar fueron: 20*50 mm (altura*diámetro) para la compactación dinámica y 36*38 mm para la compactación estática.

3.3. PLAN DE ENSAYOS

Con el fin de cumplir los objetivos planteados en este trabajo, se plantea un plan de ensayos dirigido a estudiar las muestras bajo las condiciones de compactación deseadas, y analizar sus características, variables y parámetros más relevantes en el comportamiento hidromecánico.

Se inicia el programa de estudios con la realización de ensayos previos de compactación dinámica, efectuando un ensayo Proctor Normal con la arcilla Boom, determinando su curva de compactación, densidad seca máxima y humedad óptima.

Posteriormente al ensayo de PN, se efectúa un ensayo de compactación dinámica al suelo en estudio, esta vez, utilizando como molde el anillo edométrico pero aplicando la misma energía que en el Proctor Normal. Obteniendo, al igual que en el ensayo anterior, la curva de compactación, densidad seca máxima y humedad óptima.

Luego de obtenidos los resultados de estos ensayos previos, se comparan y se analiza la influencia de la escala o tamaño del equipo (molde y masa metálica) en las condiciones alcanzadas en un suelo compactado.

En base a los resultados de la compactación realizada con el anillo edométrico, se seleccionó estudiar el suelo en las condiciones de humedad óptima y densidad seca máxima alcanzadas en este ensayo, y un punto en condiciones del lado seco de la curva de compactación. Para ello, se fabricaron muestras con humedad de 32% correspondiente a una densidad seca de 1.32 g/cm^3 y de 26% de humedad correspondiente a una densidad seca de 1.22 g/cm^3. Bajo cada una de estas condiciones, se compactaron muestras de manera dinámica y estática.

A las muestras compactadas se les realizaron ensayos de consolidación isótropa utilizando el equipo triaxial, estudios de porosimetría empleando el método de intrusión de mercurio, y se efectuaron medidas de succión.

3.4. METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

3.4.1. COMPACTACIÓN: ENSAYOS PREVIOS

-Compactación dinámica: ensayo Proctor normal (PN)

Inicialmente, con el fin de conocer y establecer las humedades con las que se realizarían las muestras para los ensayos, se efectúo un ensayo PN a la arcilla Boom para obtener la curva de compactación (Densidad seca-humedad) con el fin de determinar la densidad seca máxima (Υ_{dmax}) y su correspondiente humedad óptima (ω_{opt}).

El ensayo se realizó atendiendo a las norma española UNE 103-500/94. La energía establecida por la norma y utilizada en el ensayo es 583 kJ/m^3, utilizando una masa metálica de 2.5 ± 0.01 kg, con una altura de caída libre de 30.5 ±0.2 cm. La Figura 3.4.1 muestra el equipo de compactación disponible en el laboratorio de geotecnia de la UPC y el utilizado en este estudio.

El ensayo consiste en compactar, en un molde cilíndrico de volumen conocido, muestras de suelo preparadas con distintas humedades pero con la misma energía de compactación, también conocida, densificando progresivamente la masa de suelo, obligando al reacomodo de las partículas, forzando al agua a ocupar los poros del suelo a través de la expulsión del aire de estos. Se registran las densidades secas y el contenido de humedad de cada muestra compactada.

Figura 3.4.1 Equipo de compactación.

El procedimiento usado para realizar el ensayo de compactación fue el siguiente:

1. Conseguido 3000 g de suelo arcilla pasante por el tamiz No. 89, (a humedad higroscópica), obtenemos el peso de los sólidos utilizando la siguiente fórmula:

$$Ws = \frac{Ws, wh}{1 + wh}$$

Donde W_s es el Peso de los sólidos, $W_{s,wh}$ es el peso del suelo con contenido de humedad higroscópica, y la w_h es la humedad higroscópica.

Con el peso de los sólidos obtenido, se calculó el peso del agua equivalente a la wh presente en el suelo, y posteriormente el peso de agua necesaria a agregar para obtener el contenido de humedad deseado (Figura 3.4.2).

Figura 3.4.2. Material (Arcilla Boom)

2. Se mezcla la masa de suelo con el agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad requerido. En este estudio, se inició con un 6% de humedad y se fue aumentando en 3% hasta pasar el óptimo, luego se incrementó la humedad en 4% en los últimos dos puntos. La masa de suelo y agua se mezcla con una espátula para lograr la homogeneización. Durante el proceso se verifica que el suelo no se seque, pesando la muestra a intervalos para evaluar el contenido de humedad y agregando agua para corregir la pérdida por evaporación.

3. Se deja la mezcla reposar, en este caso, de 30 a 40 minutos (ideal sería 24 horas) tapada con plástico para permitir que la humedad se homogenice en todo el material y evitar que éste se seque (Figura 3.4.3). Luego de las 24 horas, se toma una parte de la mezcla, se seca al horno y se determina el contenido de humedad.

Figura 3.4.3. Mezcla reposando antes de compactar

4. Se coloca la muestra en el molde, previamente pesado y engrasado para minimizar la fricción entre la muestra y el molde. El material se coloca dividiéndolo en tres capas y compactando cada capa con 26 golpes repartidos de forma uniforme en todo en diámetro del molde, antes de introducir el material para la última capa, se coloca

el collarín para asegurarse de que el material sobrepase el borde superior del molde. Luego de compactar, se retira el cuidadosamente el collarín, se enrasa bien la parte superior del molde, asegurando que el volumen completo del molde esté ocupado por el suelo compactado. La Figura 3.4.4 muestra la arcilla mezclada y compactada a diferentes humedades.

5. Luego de enrasar y limpiar el exceso de suelo del molde, se pesa este con el suelo compactado y se mide la humedad secando una muestra al horno. Este proceso se repite con cada una de las humedades establecidas y se calculan las densidades secas y humedades de cada compactación.

Figura 3.4.4.Fotos superiores: material preparado; Fotos inferiores: material compactado

6. Con los datos de densidades secas y humedades obtenidos, se construye la curva Proctor de la arcilla Boom. Cada punto en el gráfico representa una compactación en la que se consigue una densidad seca correspondiente a una humedad.

Compactación dinámica: anillo edométrico

Como se mencionó en el apartado 3.2, las dimensiones de las probetas a estudiar, en el caso de la compactación dinámica, es de 20 * 50 mm, y con el fin de conocer la relación o el efecto que puede tener la escala al momento de determinar la curva de compactación de un suelo, se realizó un ensayo de compactación dinámica utilizando un equipo compuesto por una base rígida, una masa para aplicar los golpes en caída libre, un collarín y molde (anillo edométrico) cuya dimensión es la misma que la probeta a estudiar (Figura 3.4.5).

Figura 3.4.5.Equipo de compactación anillo edométrico

Al igual como se hizo en el ensayo de PN, se realizaron varias compactaciones, siguiendo un procedimiento análogo a éste ensayo, con la variante del molde y la cantidad de suelo necesario utilizado, pero teniendo el mismo rango de humedades. El procedimiento usado para realizar el ensayo de compactación en el anillo edométrico fue análogo al utilizado para el Proctor Normal, con las siguientes variaciones:

- La cantidad de suelo utilizada es 100 g de suelo arcilla pasante por el tamiz No. 89.

- Debido a que el equipo utilizado para esta compactación no es el equipo normalizado del Proctor, se determinó la cantidad de golpes necesario para aplicar la misma energía que en el ensayo PN, pero con el equipo mostrado en la Figura 3.4.5*Figura 3.4.5.Equipo de compactación anillo edométrico*, utilizando la expresión 3.4.1.

$$N = \frac{E * V}{W * h} \qquad (3.4.1)$$

Donde E es la energía aplicada (5583 kJ/m^3), V es el volumen del molde (0.00003926 m^3), W es el peso de la masa (0.01 kN), h la altura de caída libre de la masa (0.15 m) y N es el número de golpes totales

- El número de golpes determinado fue 16, los cuales se aplicaron de manera uniforme sobre una única capa de suelo en el molde, a diferencia con el PN que fueron 3 capas y 26 golpes por capa.

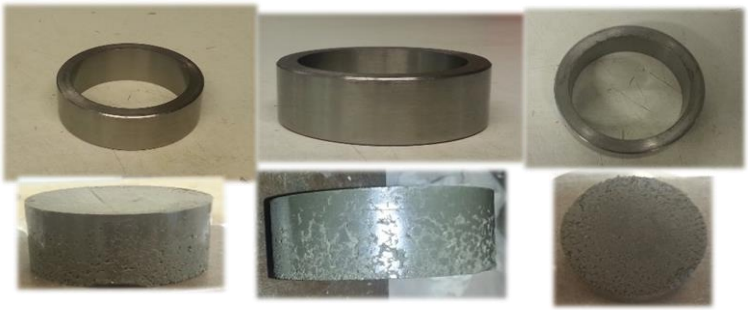


Figura 3.4.6. Anillo edométrico y muestra compactada en el anillo

Luego de compactar, se continuó un proceso equivalente al PN, y con los datos de densidades secas y humedades obtenidos, se construye la curva Proctor. En la Figura 3.4.6 se puede ver las muestras compactadas dinámicamente utilizando el anillo edométrico.

Al comparar los ensayos de compactación en el anillo edométrico, se observó que existen divergencias entre los resultados de los mismos, esto se cree es debido al efecto del tamaño de la muestra. El, tamaño, volumen y peso de la muestra del anillo edométrico están definidas por magnitudes pequeñas, a diferencia con el PN que cada una de estas variables son determinadas por magnitudes mayores. Como consecuencia de lo anterior expresado, una pequeña diferencia que pueda ocurrir durante la realización del ensayo, como por ejemplo, una mínima variación al enrasar la muestra compactada, en la muestra más pequeña influirá más en el valor medido del peso de la muestra y por consiguiente en la obtención de las densidades.

- Comparación compactación dinámica PN y anillo edométrico

Al comparar las curvas Proctor resultantes del ensayo de compactación PN y los ensayos de compactación con el anillo edométrico, se observa una notable diferencia en las densidades secas obtenidas entre ambos tipos de ensayos. Las densidades conseguidas al compactar con el anillo edométrico son mucho menores que las obtenidas con el PN, sin embargo, independientemente del molde utilizado, las humedades optimas alcanzadas dieron valores similares en el orden del 30% al 33%. La diferencia entre las densidades obtenidas en ambos tipos de compactaciones se debe a que el efecto de la fricción en las paredes es mucho mayor en la muestra más pequeña. El efecto de la fricción puede considerarse ligado al valor del perímetro por unidad de área que es inversamente proporcional al diámetro de la muestra.

De los ensayos de compactación realizados con el anillo edométrico, se tomó el ensayo 3 como base para establecer las variables de densidad seca máxima y humedad óptima con miras a fabricar las muestras para los ensayos de consolidación isótropa, medidas de succión y porosimetría.

- Compactación Estática

Como se enunció al inicio de este trabajo, el objetivo principal de este estudio es realizar una comparación entre las características hidromecánicas de la arcilla compactada dinámica y estáticamente. En este apartado se tratan los aspectos de las compactaciones estáticas que se llevaron a cabo en este trabajo, los procedimientos y equipos utilizados para su realización.

Figura 3.4.7 Prensa de compactación estática

Las compactaciones estáticas se realizaron utilizando la prensa automática disponible en el laboratorio de geotecnia de la UPC, ver Figura 3.4.7. A diferencia de la compactación dinámica, en la compactación estática es posible controlar los parámetros de densidad seca y humedades que son inciertos en la compactación dinámica hasta no terminar el ensayo, permitiendo así obtener muestras con las características deseadas para ser estudiadas. Es por esto que la compactación estática permite reproducir muestras más repetibles que la compactación dinámica.

El procedimiento usado para realizar la compactación estática es el siguiente:

1. El suelo de arcilla pasante por el tamiz No. 89 ASTM (0.30 mm) a humedad higroscópica de aproximadamente 3%. Se determina el peso de suelo necesario para obtener la densidad seca requerida a la humedad establecida.

$$W_{scomp} = \Upsilon_d * V_{comp} * (1+\omega)$$

Donde Ws_{comp} es la masa de suelo de compactación, Υ_d es la densidad seca elegida (1.22 y 1.33 g/cm^3), V_{comp} es el volumen del molde de compactación que será el volumen de la muestra compactada, en este caso las dimensiones son diámetro ø = 38 mm y altura h= 36 mm y ω es humedad de la muestra (26% y 32%).

2. Se mezcla la masa de suelo con el agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad deseado, en este caso se compactaron muestras con dos humedades (26% y 32%). Para estimarla, se consideró que inicialmente el suelo tiene la humedad higroscópica.

$$W_{wcomp} = W_{scomp} * (\omega - \omega_h)$$

Donde W_{wcomp} es el peso del agua de compactación, W_{scomp} es la masa de suelo de compactación, ω es la humedad de la muestra y ω_h es la humedad higroscópica.

3. La masa de suelo y agua se mezcla con una espátula para lograr la homogeneización. Durante el proceso se verifica que el suelo no se seque, pesando la muestra a intervalos para evaluar el contenido de humedad y agregando agua para corregir la pérdida por evaporación.

4. Se deja la mezcla reposar durante, al menos, 24 horas cubierta con plástico para permitir que la humedad se homogenice en todo el material y evitar que se seque. Luego de las 24 horas, se toma una parte de la mezcla, se seca al horno y se determina el contenido de humedad.

5. Se coloca la cantidad de mezcla exacta en el molde compactador estático (Figura 3.4.8) Un molde cilíndrico y rígido que forma probetas 76 mm de altura y 38 mm de diámetro, en este caso, con ayuda de anillos de 20mm de altura las probetas a fabricar tienen 36 mm de altura y 38 mm de diámetro. El molde es previamente engrasado para minimizar la fricción entre el suelo y el molde.

Figura 3.4.8. Molde de compactación estática.

6. El molde se coloca en la prensa (Figura 3.4.7) y es compactado por el avance del pistón, a una velocidad de 1mm/min. Una vez compactado, se desmonta y se tiene lista la muestra Figura 3.4.9. Se midió la tensión aplicada a cada probeta hasta compactar a la densidad y volumen deseados utilizando una célula de carga instalada en la prensa. En la Figura 3.4.9 se puede ver la muestra compactada estáticamente.

Figura 3.4.9. Muestra compactada estáticamente en la prensa

3.4.2.ENSAYO CONSOLIDACIÓN ISÓTROPA

Este ensayo tiene como finalidad, la determinación de la Presión de Preconsolidación en estado saturado (P_o). El aparato utilizado para realizar este ensayo fue el equipo trixial.

-Equipo triaxial:
En este estudio para realizar los ensayos se utilizó un equipo triaxial GDS automático, acondicionado para ensayos sobre muestras en condiciones saturadas. La Figura 3.4.10. **Equipo triaxial automático GDS Instrumental Ltd.** muestra el equipo triaxial automático GDS Instrumental Ltd. y sus componentes disponibles en el laboratorio.

El equipo está compuesto por dos pistones controladores de presión y volumen (presión de cámara y presión de cola), una cámara triaxial, caja de controles, un sistema de control y adquisición de datos manejados desde un ordenador.

Las presiones, tanto la de cámara como la de cola, son aplicadas a través de la inyección de agua e impuestas mediante los pistones automáticos, los cuales son controlados por un motor paso a paso que permiten el desplazamiento de los pistones, permitiendo el control de la presión con una resolución de 1 kPa y el control del volumen de agua hasta 0.5mm^3/paso. La presión de cámara y la presión de cola (a través del cabezal inferior) se miden con transductores internos en el controlador, mientras que la presión de poros (a través cabezal superior) es medida con un transductor externo que opera en un rango de 0 a 2 MPa. Los pistones que aplican las presiones y los transductores de medidas, son controlados a través de un software de adquisición y control de datos desarrollado por la misma empresa que fabricó el equipo, manipulado desde un computador.

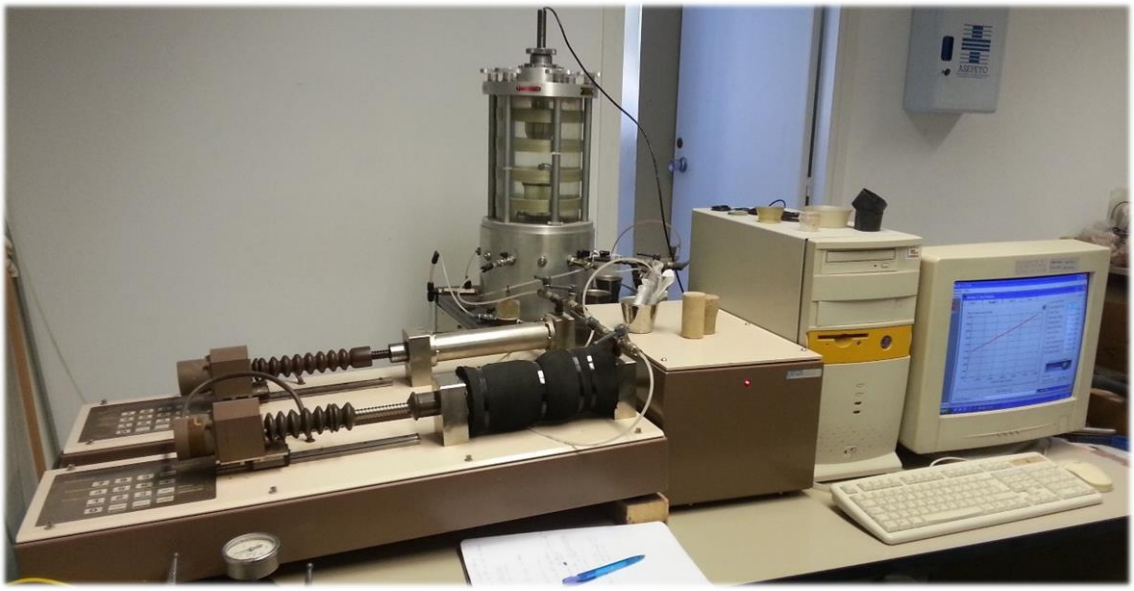


Figura 3.4.10. Equipo triaxial automático GDS Instrumental Ltd.

-Característica de los ensayos de consolidación realizados

En los ensayos se estudiaron probetas compactadas dinámica y estáticamente, bajo las mismas condiciones y aplicándoles las mismas tensiones para así poder comparar los resultados obtenidos en los estudios. Las características de los ensayos realizados en el equipo triaxial son:

- Dimensiones de las probetas:
  - Compactación dinámica: ø = 50 mm, h= 20mm
  - Compactación estática: ø = 38 mm, h= 36 mm
- Presión inicial de confinamiento de 30 kPa.
- Presión de cola constante de 20 kPa.
- Presión de confinamiento final de 1690 kPa.

- *Metodología y procedimiento del ensayo*

En primera acción, iniciar el equipo en el siguiente orden: pistones, caja de controles y ordenador.

Saturación del equipo

Antes de iniciar las pruebas, es necesario asegurarse de que todas las tuberías y conductor, pistones, válvulas y piedras porosas estén llenas de agua eliminando las posibles burbujas de aire. Como el estudio de consolidación se realizó con dos probetas de diámetros diferentes, el pistón donde se coloca la muestra debe cambiarse dependiendo del diámetro de la misma.

Luego de saturado e iniciado el equipo, se coloca la muestra previamente preparada (compactada). Esta probeta es colocada sobre un pistón que varía dependiendo del diámetro de la probeta, y es cubierta con una membrana de látex y sellada en los bordes

con juntas tóricas para impedir el paso de agua de la cámara a la muestra. Por último se coloca la cámara, se sella y se llena de agua.

Confinamiento y saturación de la muestra

Se inicia aplicando una presión de confinamiento a la muestra, imponiendo una presión de cámara de 30 kPa y una presión de cola de 20 kPa. Luego de aplicado el confinamiento, se procede a saturar la muestra, permitiendo el flujo de agua a través de la misma. En general, el proceso de saturación requirió un tiempo mínimo de 24 horas. Se comprueba que la muestra esté saturada constatando que el valor del volumen de agua entrante a la muestra en su base inferior sea igual al volumen saliente en su base superior.

$$V_{entra} = V_{salida.}$$

Carga-Consolidación de la muestra

Luego de verificar que la muestra está saturada, se cierra la válvula de salida de agua en la base superior de la muestra. El ensayo de consolidación isótropa, se realizó en una sola etapa de carga, completada en un plazo de 48 horas mínimo (siempre no se presentara ningún inconveniente): Se inició la etapa de consolidación aumentando la presión en la cámara, desde la presión de confinamiento de 30 kPa hasta alcanzar el valor de la tensión total de 1690 kPa, manteniendo la presión de cola constante en 20 kPa. A pesar de que la fase de consolidación idealmente se realizaría en una sola etapa, en el caso del surgimiento de algún inconveniente, (problemas con el equipo o aumento violento de la presión de poros), se crearon etapas intermedias que permitieron controlar o manejar dichos problemas y realizar la fase de consolidación.

Durante el proceso de carga, es importante monitorear la presión de poros, ya que esta idealmente no debería superar en 20 kPa a la presión de cola impuesta, pero en ningún momento puede llegar a ser mayor que la presión en la cámara. En caso que la presión de poros llegue a ser muy alta en un momento joven del transcurso de carga, es necesario detener el proceso de carga, crear una nueva etapa manteniendo las presiones alcanzadas y esperar a que la presión de poros se estabilice. Luego que la presión de poros haya bajado, se creó otra etapa para proseguir con la consolidación.

Descarga

Posteriormente a alcanzar la carga máxima impuesta, se procede a la descarga. Este proceso se hizo de manera rápida y no drenada, cerrando las válvulas tanto de entrada como de salida de agua a la muestra.

Por último, se vacía y se desmonta la cámara, se retira la muestra y se miden las condiciones finales de humedad en la misma. Es importante tener en cuenta que al terminar el ensayo la muestra estará muy húmeda, se debe manipular con cuidado y secar el exceso de agua en el exterior de la muestra. La
Figura 3.4.11 muestra las etapas de confinamiento, saturación de la muestra, carga isótropa, y descarga.

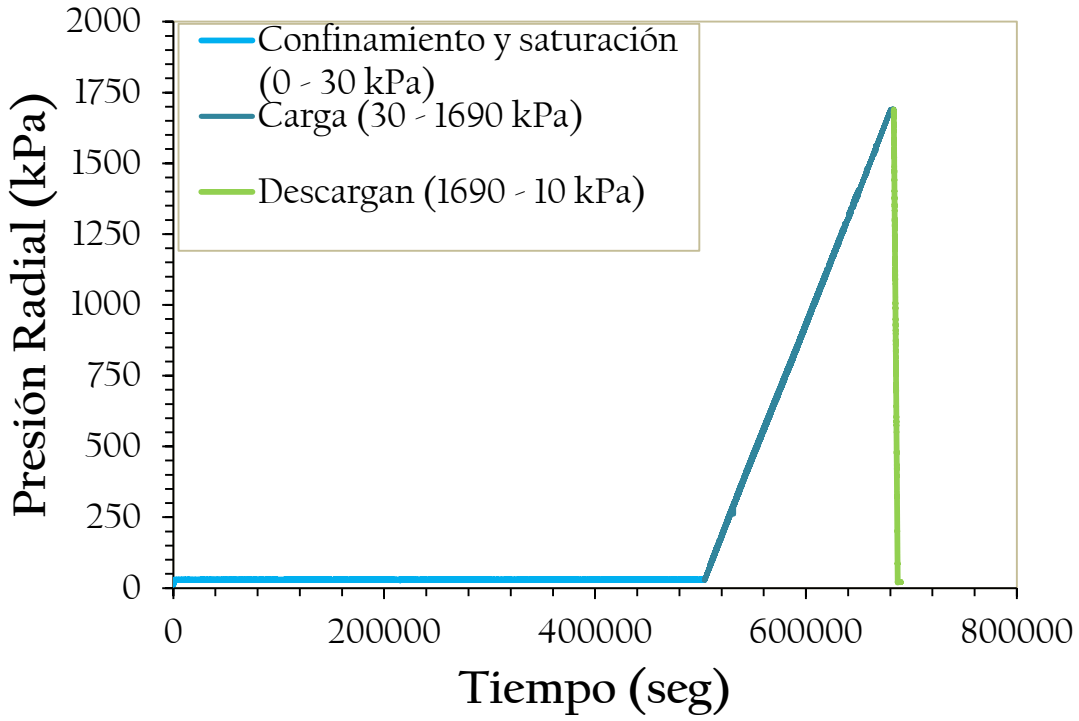


Figura 3.4.11. Etapas de aplicación de presiones del ensayo de consolidación isótropa

Procesamiento de los datos del Triaxial

Una vez terminado el ensayo obtenemos los datos registrados y guardados por el software en el ordenador en formato .gds que se deben convertir a formato xlsx (Excel). La Tabla 3.4.1 muestra el formato típico de los archivos de salida del triaxial.

Tabla 3.4.1. Formato típico de un archivo de datos de salida de un ensayo triaxial.

Etapa Nº	Tiempo seg	Presión Radial kPa	Vol. Radial kPa	Presión de Cola kPa	Volumen De Cola mm^3	Célula de carga (kN)	Presión Poros kPa	Desplazamiento axial
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16

Para el procesamiento de los datos del ensayo, y realizar los cálculos para determinar los parámetros requeridos, se midieron y calcularon las condiciones iniciales de las probetas, área, volumen, humedad, saturación densidades índice de poros, utilizando las siguientes expresiones.

$$Vo = A * Ho; \quad A = \pi * r^2; \quad \omega o = \frac{Ww}{Ws} * 100 \qquad (3.4.2)$$

$$Sr = \frac{\frac{Ww}{\rho w}}{Vo - \frac{Ws}{\rho s}}; \qquad eo = \frac{Vo - \frac{Ws}{\rho s}}{\frac{Ws}{\rho s}} \tag{3.43}$$

Donde r y H_o son el radio y la altura inicial de las muestras, respectivamente, ρ_s es el peso específico de las partículas ρ_s= 2.7 g/cm^3, ω_o es la humedad inicial de las muestras compactadas, el peso de los sólidos Ws se calcula a partir de la humedad final de las muestras ω_f. El grado de saturación, Sr, y el índice de poros e_o inicial de las muestras fueron calculados en función de las condiciones iniciales de volumen, humedad y densidad de las muestra.

Para el procesamiento de los resultados y análisis de las muestras tras el proceso de saturación, se ha realizado un retro-análisis del volumen de poros, partiendo de las condiciones finales (humedad conocida y saturación total) y retrocediendo hasta encontrar las condiciones de las muestras justo antes del proceso consolidación. Tras este análisis, se puede ver que durante la etapa de saturación las muestras tienen cambios volumétricos asociados a la deformabilidad, tanto colapso como hinchamiento. Sin embargo, para los cálculos y el análisis se ha considerado que durante la etapa de saturación no se produce cambio alguno hasta completarse ésta etapa e iniciar la de consolidación. La Tabla 3.4.2 muestra el esquema seguido para procesar los datos de los ensayos de consolidación.

Tabla 3.4.2. Esquema de las variables a calcular a través del proceso de los datos de la tabla 3.

Volumen de la muestra mm^3	Def. Volumétrica	e	p' kPa	Densidad Seca g/cm^3
A	B	C	D	E

EL volumen, la humedad y el peso inicial de cada muestra fueron obtenidos de forma directa midiendo y pesando las muestras compactadas antes de ensayarlas. Las densidades, e y Sr iniciales se determinaron en función de estos valores medidos y el peso seco final obtenido. Así también, los cálculos realizados para el proceso de consolidación se hicieron en función de las condiciones finales de las muestras, a partir del peso seco y humedad final, partiendo de un volumen final calculado y retrocediendo hasta conseguir el volumen supuesto que se tiene luego de saturar y antes de consolidar a muestra.

$$Vf = \frac{Ws}{\rho s} + \frac{\omega f * Ws}{\Upsilon \omega} \tag{3.4.4}$$

Los cálculos que se desarrollaron para completar la Tabla 3.4.2 para cada ensayo de consolidación fueron los siguientes:

Vol. de la muestra será igual al volumen final de la expresión 3.5 más la variación del volumen de cola entre la celda final con el volumen de cola de la celda del momento calculado.

$$A = Vf + (C5 - C13fijo)$$

La deformación volumétrica

$$B = \frac{A - Vo}{Vo}$$

El índice de poros viene en función del índice de poros inicial y la deformación volumétrica.

$$C = eo - (B * (1 + eo))$$

Presión efectiva viene dada en función de la presión radial menos las presiones de agua, tanto la de poros como la de cola

$$D = C2 - (C4 + 2 * C7)/3$$

La densidad seca varia

$$E = \frac{A}{Ws}$$

Una vez realizado los cálculos y completado la tabla, se dibujaron las curvas de compresibilidad de las que se obtuvieron la presión de preconsolidación P_o' y el parámetro índice de compresibilidad λ.

Obtención de la Presión de Preconsolidación, P_o'.

La presión de preconsolidación, (P_o)' es la máxima tensión a la que se ha visto sometido un suelo a lo largo de su historia geológica. Es un parámetro fundamental para el estudio de la respuesta del suelo frente a carga, ya que separa las deformaciones elásticas de las deformaciones plásticas, es decir, las deformaciones recuperables de las irrecuperables.

Diversos autores han propuesto métodos para calcular la presión de preconsolidación de una muestra de suelo. Casagrande (1936), Pacheco Silva (1970), Juárez y Rico (1976), Becker *et al.* (1987), Gregory *et al.* (2006). De todos estos métodos el más desarrollado es el método de Casagrande (1936). (R. Tomás et al. 2010).

El objetivo de este apartado es exponer los métodos utilizados para el cálculo de la preconsolidación a la que se sometieron las muestras durante el proceso de

compactación de este estudio. Los métodos utilizados fueron el de Casagrande (1936), Pacheco Silva (1970) y Becker et al. (1987).

Descripción de los métodos utilizados

Método de Casagrande (1936):

- Ubicar el punto que corresponde al punto de mayor curvatura (O), es decir, el mínimo radio de curvatura de la curva.
- Desde el punto de mayor curvatura (O), trazar una recta paralela al eje x (A) y otra recta tangente a dicho punto (T).
- Trazar la bisectriz (B) del ángulo formado por AOT.
- Trazar la recta de prolongación del tramo recto de la curva de consolidación (C-D).
- Determinar el punto de intersección (I) entre la bisectriz y la recta (C-D) y desde este punto trazar una línea perpendicular a la abscisa hasta interceptar dicho eje. El punto de intersección corresponde al valor de la presión efectiva de preconsolidación P_o'.

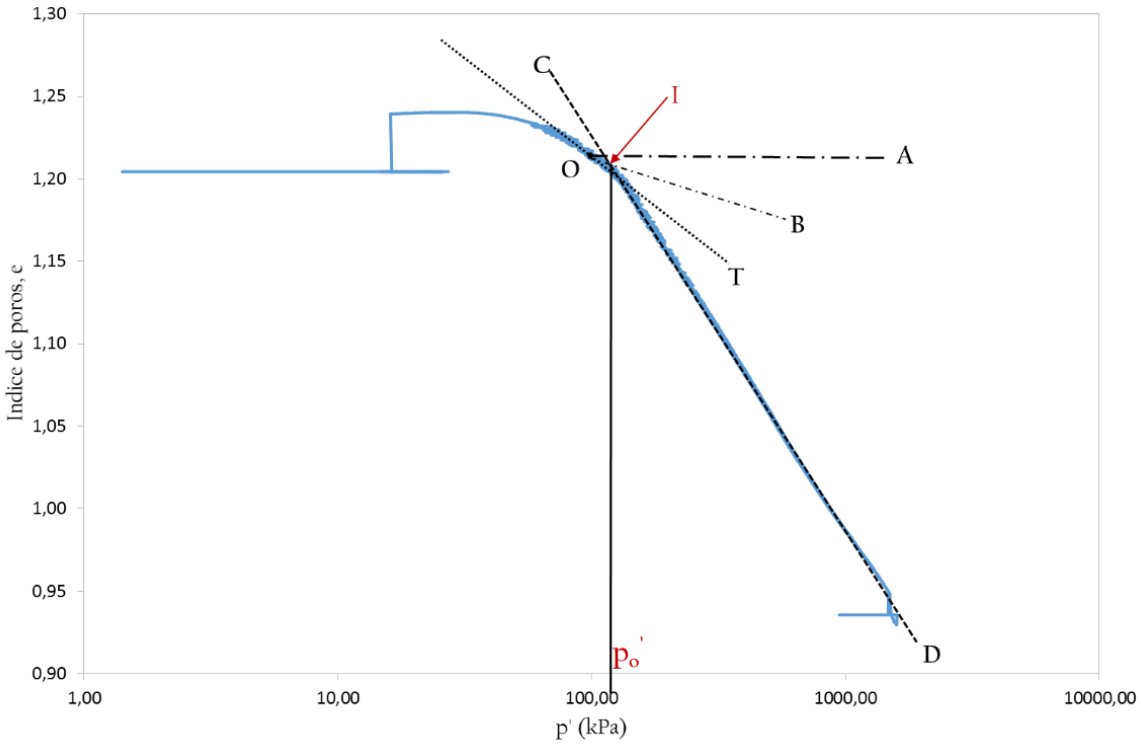


Figura 3.4.12. Determinación de la presión de preconsolidación método de Casagrande (1936)

La Figura 3.4.12 muestra un esquema del método de Casagrande. Este método gráfico, presenta una importante componente subjetiva, tanto al seleccionar el punto de mínimo radio de curvatura como colocar la recta prolongando la parte recta de la curva en algunos casos.

Método de Pacheco Silva (1970):

- Trazar una recta (A-B) paralela al eje de la abscisa que pasa por el punto (0, e_0).
- Trazar la recta de prolongación del tramo recto de la curva de consolidación (C-D) hasta intersectar con la recta (A-B).
- Desde el punto de intersección de las rectas A-B y C-D, tranzar una recta perpendicular al eje de la abscisa hasta intersectar la curva de consolidación (M).
- Desde el punto M, trazar una recta paralela al eje la abscisa hasta interceptar (I) la recta de prolongación C-D. Desde el punto de intersección (I) trazar una línea perpendicular a la abscisa hasta interceptar dicho eje. El punto de intersección corresponde al valor de la presión efectiva de preconsolidación P_o'.

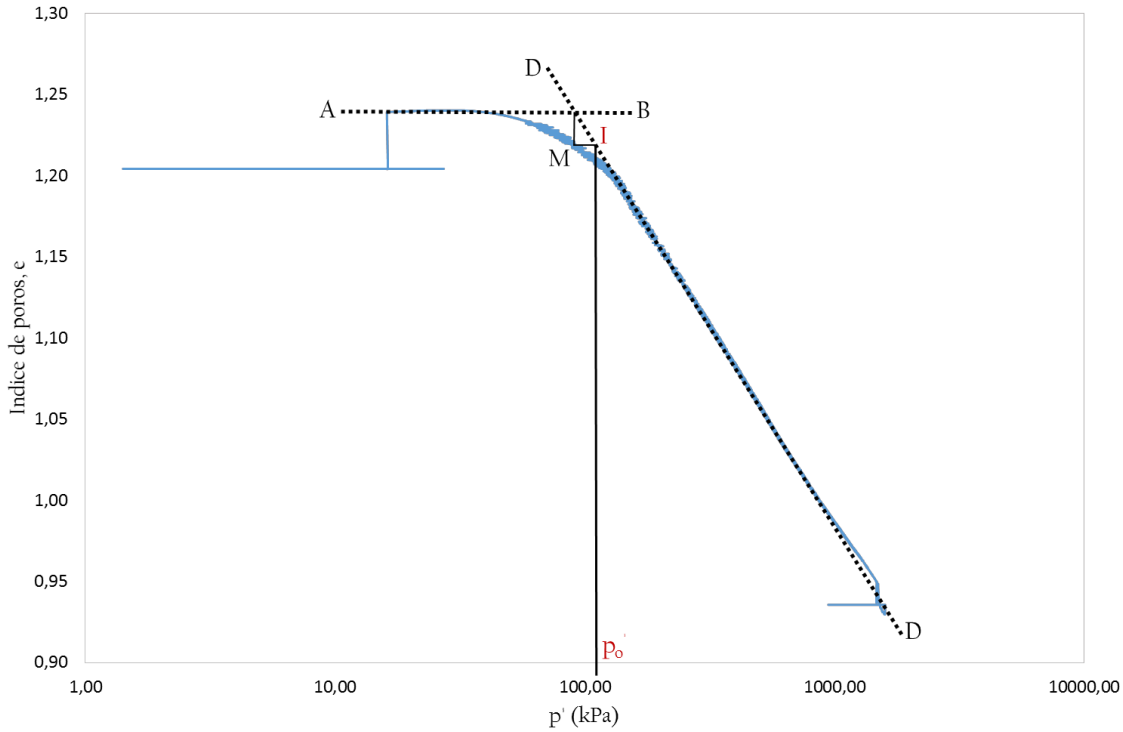


Figura 3.4.13. Determinación de la presión de preconsolidación método Pacheco Silva (1970)

La Figura 3.4.13 muestra el esquema del método de Pacheco Silva. Este se basa totalmente en una construcción grafica que lo hace difícil de aplicar a determinadas curvas edométricas al momento de colocar las rectas.

Método Becker et al. (1987):

Éste método relaciona la energía utilizada para compactar la muestra con la tensión aplicada.

Define el trabajo por unidad de volumen (ΔW) para cada incremento de carga continua, usando $\Delta W=0.5*(\sigma'_{i+1}+\sigma'_i)*(defvol_{i+1}-defvol_i)$. Se grafica W y la presión aplicada.

- Trazar la recta (A-B) paralela al eje de la abscisa (eje x).
- Trazar una recta (C-D) prolongando la línea de consolidación.
- En el punto de intersección de las dos rectas, trazar una recta perpendicular al eje de la abscisa hasta intersectar la curva en el punto (O), este punto corresponde al valor de la presión de preconsolidación P_o'.

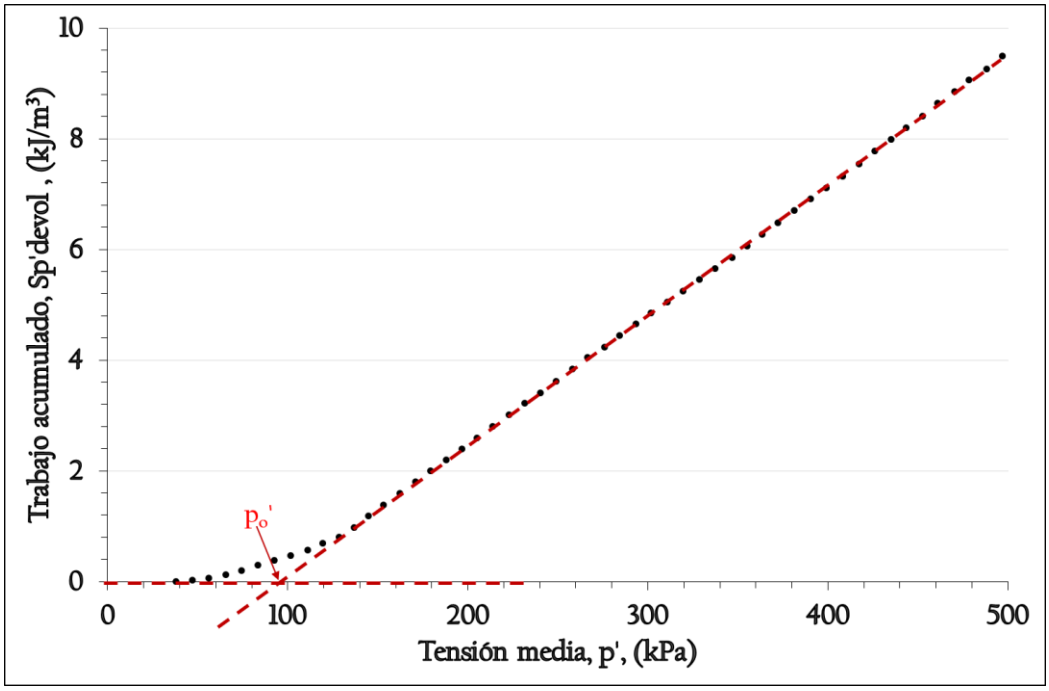


Figura 3.4.14 Determinación de la presión de preconsolidación método Becker et al (1987).

La Figura 3.4.14 muestra el esquema del método Becker.

Determinación de la permeabilidad saturada

Una definición general de la permeabilidad de un suelo es que la permeabilidad es la capacidad que tiene el suelo de permitir el flujo de agua a través de los poros sin alterar su estructura interna. El ensayo de permeabilidad permite conocer la velocidad con la que pasa el agua a través del esqueleto del suelo en función del caudal que es la relación entre el volumen de agua por unidad de tiempo que pasa a través de la muestra de suelo.
El cálculo de la permeabilidad del suelo en estudio, se realizó en las muestras compactadas utilizando el equipo triaxial, GDS disponible en el laboratorio en el que se realizaron los ensayos de consolidación. Se consideraron los datos del volumen de entrada de agua a la muestra (igual al de salida) en los últimos instantes en la fase de saturación.

$$K = \frac{Q}{A*i} \; ; \quad Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Donde, Q es el caudal calculado en base al volumen registrado en un intervalo de tiempo fijo, A es el área transversal de la muestra, *i*, es el gradiente de la altura piezométrica.

3.4.3. POROSIMETRÍA POR INTRUSIÓN DE MERCURIO (MIP)

Con el fin de conocer la estructura interna del suelo estudiado, se han llevado a cabo ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) de muestras con diferentes condiciones como tipo de compactación, humedades y densidades.

La porosimetría por inyección de Hg es una técnica utilizada en la caracterización del sistema poroso de los materiales. Se basa en la aplicación de presión y así forzar la entrada del mercurio en el esqueleto poroso del sólido. Esta técnica se utiliza para determinar el área y el volumen de macro y microporos y calcular la distribución de la porosidad del material (Romero, 1999).

Los datos de distribución de tamaños de poros obtenidos mediante porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) se relaciona con algunas características del comportamiento del suelo. Las observaciones a estos niveles microestructurales permiten profundizar en el conocimiento de altos niveles estructurales y sus interrelaciones desde ambos puntos de vista, hidráulico y mecánico. Los datos MIP en esta investigación se utilizan para proporcionar información sobre los cambios de la estructura afectada por la compactación de la muestra (Romero 1999).

- *Equipo Porosímetro*

Las pruebas MIP se llevaron a cabo en un porosímetro ' Autopor IV 9500' de la casa Micromeritics Instruments Figura 3.4.15, siguiendo el procedimiento de pruebas ASTM D4404 para examinar la estructura y de los poros del suelo. Este equipo consta de dos unidades: una de baja presión de 0 a 345 kPa (presión absoluta en cámara de vacío), donde se obtienen medidas de diámetro de poro aparente de 3.6 a 360 µm evacuando inicialmente el aire de la muestra por aplicación de vacío, e introduciendo mercurio posteriormente. El volumen de mercurio V que penetra en los poros se mide directamente como una función de la presión aplicada. La ecuación de Washburn, que asume que todos los poros son cilíndricos (aunque en realidad raramente los son) proporciona una representación práctica de la distribución de los poros. (González, 2012).

Figura 3.4.15. Porosímetro Autopore IV 9500.

Dos tipos de porosidad pueden determinarse con un ciclo de intrusión y extrusión. La intrusión llena todos los espacios de poros accesibles e interconectados, dando la distribución de la porosidad total, mientras que la liberación completa de la presión de intrusión permitirá expulsar sólo una parte del mercurio de los poros, definiendo así la porosidad libre (Delage y Lefebvre, 1984). La diferencia entre el ciclo de intrusión y el de extrusión es la porosidad atrapada. La porosidad atrapada proviene de las constricciones formadas por puentes de arcilla y agregados de forma irregular que actúan como "cuellos de botella" atrapando el mercurio en los inter-agregados de los poros (Romero et al. 1999).

- *Metodología y procedimiento del ensayo*

De cada muestra estudiada, es decir, de los dos tipos de compactación a diferentes humedades y densidades secas, se obtuvieron cuidadosamente especímenes cúbicos de aproximadamente 10 mm de lado, que posteriormente fueron liofilizados para eliminar el agua de los poros y guardados en desecador hasta la realización del MIP. Se asume que con este método no ocurre retracción por secado que altere la microestructura de las muestras. La liofilización es un proceso utilizado para la eliminación del agua por sublimación, mediante desecación al vacío y a muy bajas temperaturas. El proceso consiste en la congelación del material, seguido de su introducción en una cámara de vacío en la que se separa el agua por sublimación.

3.4.4.MEDIDA DE SUCCIÓN

La compactación es un proceso rápido, por lo que no da tiempo a que se produzca expulsión de agua del interior del terreno, en resultado, el proceso tiene lugar sin drenaje, por lo que sólo tiene sentido en el caso de suelos parcialmente saturados. Un

suelo parcialmente saturado presenta, a igualdad de índice de poros, una mayor resistencia mecánica que en la condición saturada o bien la seca. La explicación para este incremento de resistencia está en considerar, la fuerza de tensión superficial que se genera entre partículas debida a la ascensión capilar de la fase líquida a través de los intersticios, proporcionando, de este modo, una resistencia adicional que se anula al cuando el suelo se satura.

En los suelos parcialmente saturados se genera y mantiene una presión negativa en el agua intersticial por lo que evidentemente el agua en contacto con las partículas sólidas ejerce una tracción entre ellas, aumentando, de este modo, la tensión actuante sobre dichas partículas. Dado que en los suelos la distancia entre partículas es variable se considera que, a efectos macroscópicos, existe una radio capilar medio. Hay que tener en cuenta que en los suelos parcialmente saturados no se cumple la ley de tensiones efectivas propuesta por Terzaghi, tal como ocurre en el caso del suelo saturado; en consecuencia hay que cuantificar la tensión actuante sobre las partículas sólidas a partir de la presión del aire (Pa) y de la presión del agua (Pw) intersticiales. Para ello se define una variable tensional, siempre positiva, denominada succión (S), tal que S= Pa-Pw. (UPC, 2013).

Los suelos compactados del lado seco y húmedo de la humedad óptima, no solo difieren en su fábrica inicial sino que también tienen una succión diferente. En un suelo compactado en el lado húmedo, los poros, mayoritariamente, están ocupados por agua, la succión es baja y el suelo es poco rígido. Por otra parte, un suelo compactado en el lado seco, el agua se encuentra en forma capilar, con presión negativa, que hace que tenga altas succiones y el suelo tenga una rigidez considerable (González, 2012).

- *Equipo utilizado*

En este estudio se utilizó un psicrómetro de punto de rocío, modelo WP4-T de la casa Decagon Devices Inc. La Figura 3.4.16 muestra el Psicrómetro disponible en el laboratorio y el utilizado en este estudio. Este equipo permite medir un rango de altas succiones, con capacidad para realizar medidas de la succión total entre 1 y 100 MPa de rango de trabajo.

El principio de funcionamiento del WP4-T se basa en la técnica de punto de rocío (con espejo frío) para medir el potencial de agua. El potencial del agua es una forma de medir el estado de la energía del agua presente dentro de un sistema. Así, el potencial del agua de una muestra líquida o sólida puede ser encontrado relacionando el potencial del agua medido en una muestra con la presión de vapor del aire en equilibrio con la muestra, es decir, que en equilibrio, el potencial del agua del aire (vapor) en un ambiente controlado (cerrado) es el mismo que el potencial del agua presente en la muestra.

El WP4 realiza la medida de la succión en una pequeña cámara hermética, donde se controlan la temperatura de la muestra con un termómetro de infrarrojos y la

temperatura del aire de la cámara con un sensor de temperatura de punto de rocío (dispositivo termoeléctrico Peltier) puesto sobre un espejo. Para detectar la primera condensación ocurrida sobre el espejo se utiliza una célula fotoeléctrica que está constantemente enviando un haz de luz el cual se refleja sobre el espejo; cuando el sensor fotoeléctrico detecta un cambio en la reflexión del haz de luz es que ha ocurrido la condensación. La cámara hermética también cuenta con un pequeño ventilador cuya función es acelerar el equilibrado dentro de la misma y controlar la conductancia en la capa de borde del sensor de temperatura de punto de rocío (Peltier). Del conjunto de medidas, se calcula la presión de vapor del aire presente en la cámara como la presión de vapor del aire saturado a la temperatura de punto de rocío. Cuando el potencial del agua de la muestra y el del aire de la cámara se encuentran en equilibrio, previa medición de la presión de vapor de la cámara y de la temperatura de la muestra para la cual se calculó la presión de vapor saturado, obtenemos el potencial del agua de la muestra. (Gómez, 2009).

La calibración del equipo se realizó con soluciones salinas de cloruro potásico (KCl) y de clorurosódico (NaCl), de concentración (succión) conocida.

Figura 3.4.16. Psicrómetro de punto de rocío modelo WP4-T

CAPÍTULO 4-ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan, analizan e interpretan los resultados obtenidos de los ensayos experimentales de este estudio realizados a la arcilla Boom teniendo en cuenta los objetivos pautados en el Apartado 1.2 de este documento.

4.1. COMPACTACIÓN DINÁMICA

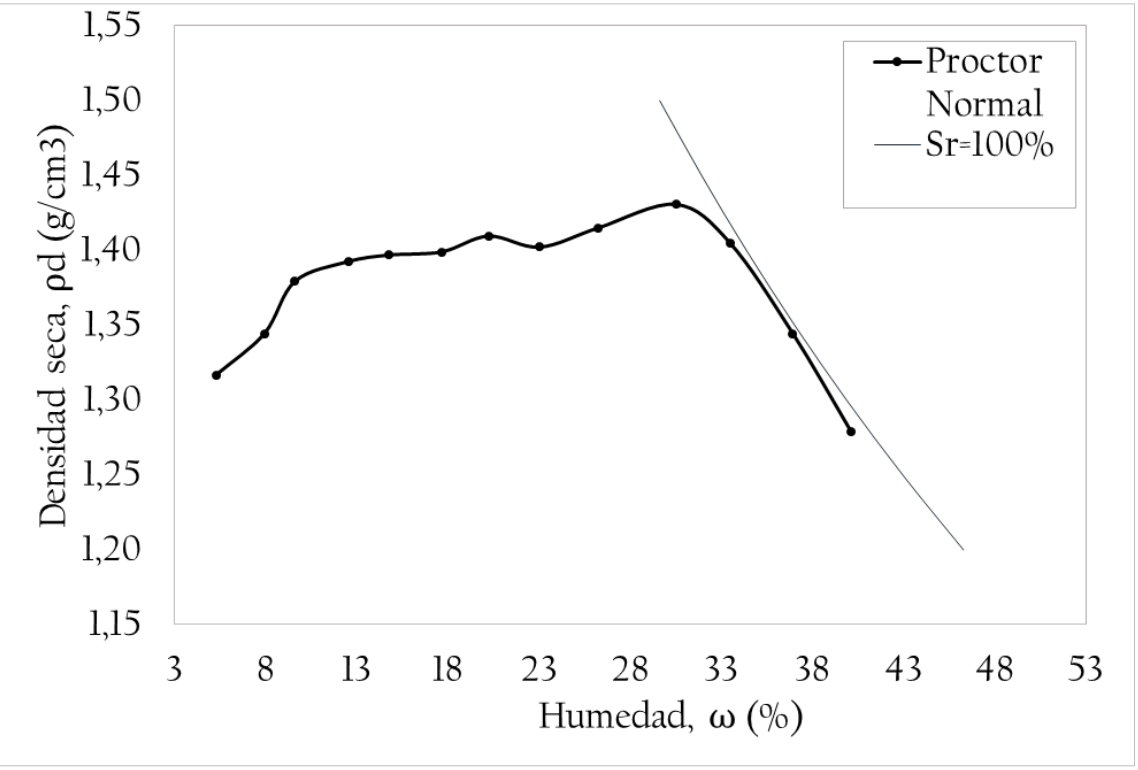


Figura 4.1.1Curva de compactación Proctor normal de la arcilla Boom.

La Figura 4.1.1 muestra la curva de compactación resultado de la ejecución del ensayo Proctor Normal, realizado a la arcilla Boom en este estudio. La densidad seca máxima de la arcilla Boom obtenida en el ensayo fue ρ_{dmax} = 1.43 g/cm^3 a una humedad óptima ω_{opt} = 30.52%. Esta densidad fue obtenida a una saturación de alrededor del 90% (Sr=0.9).

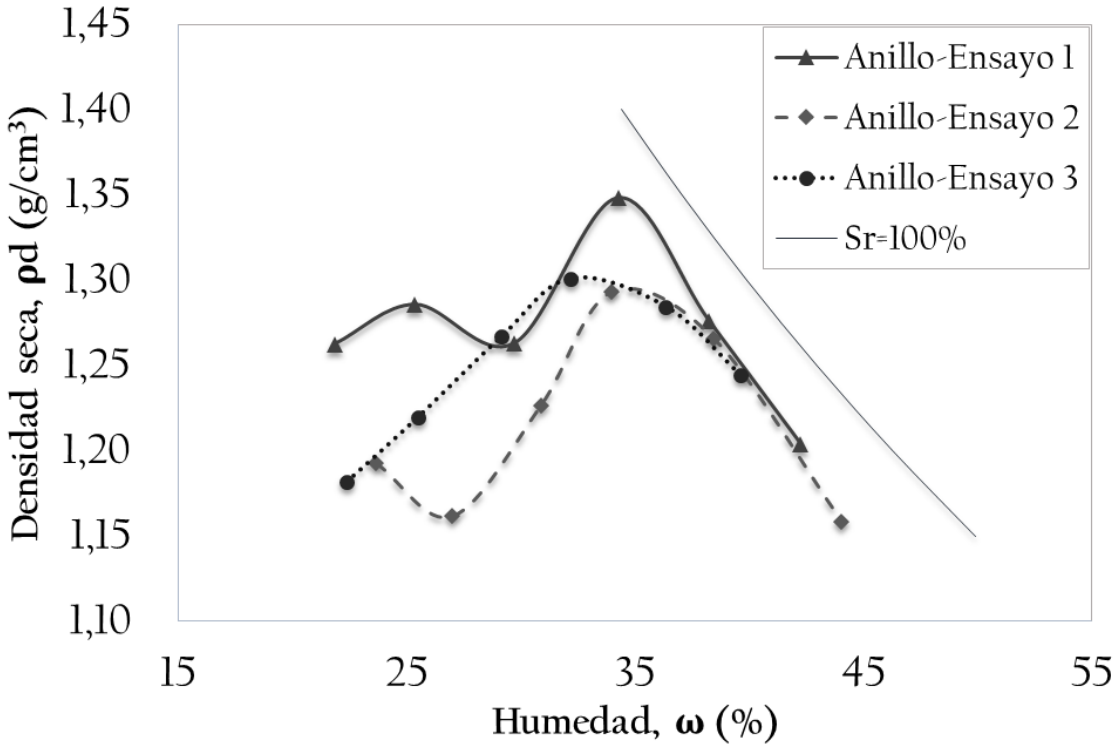


Figura 4.1.2.Curvas de compactación de la arcilla Boom. Ensayos con el anillo edométrico.

La Figura 4.1.2 muestra los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de compactación dinámica realizados a la arcilla Boom utilizando como molde el anillo edométrico y aplicando la energía del Proctor Normal. Los ensayos han dado resultados ligeramente diferentes entre sí. Los valores de la densidad seca máxima ρ_{dmax} variaron entre 1.30 – 1.35 g/cm³ y la humedad optima ω_{opt} dio valores entre 32% y 34 %.

La Tabla 4.1.1 muestra un resumen de los resultados, densidades máximas y humedades óptimas, obtenidas en los ensayos con el anillo edométrico.

Tabla 4.1.1.Resultados de los ensayos de compactación con el anillo edométrico.

Ensayo Anillo edométrico	Densidad seca máxima (g/cm³)	Humedad óptima (%)
Ensayo 1	1.35	34.26
Ensayo 2	1.29	34.00
Ensayo 3	1.30	32.20

La curva resultante del ensayo 3 (Anillo-Ensayo 3) se tomó como base para seleccionar y establecer las condiciones de humedades y densidades para fabricar las probetas analizadas en este estudio.

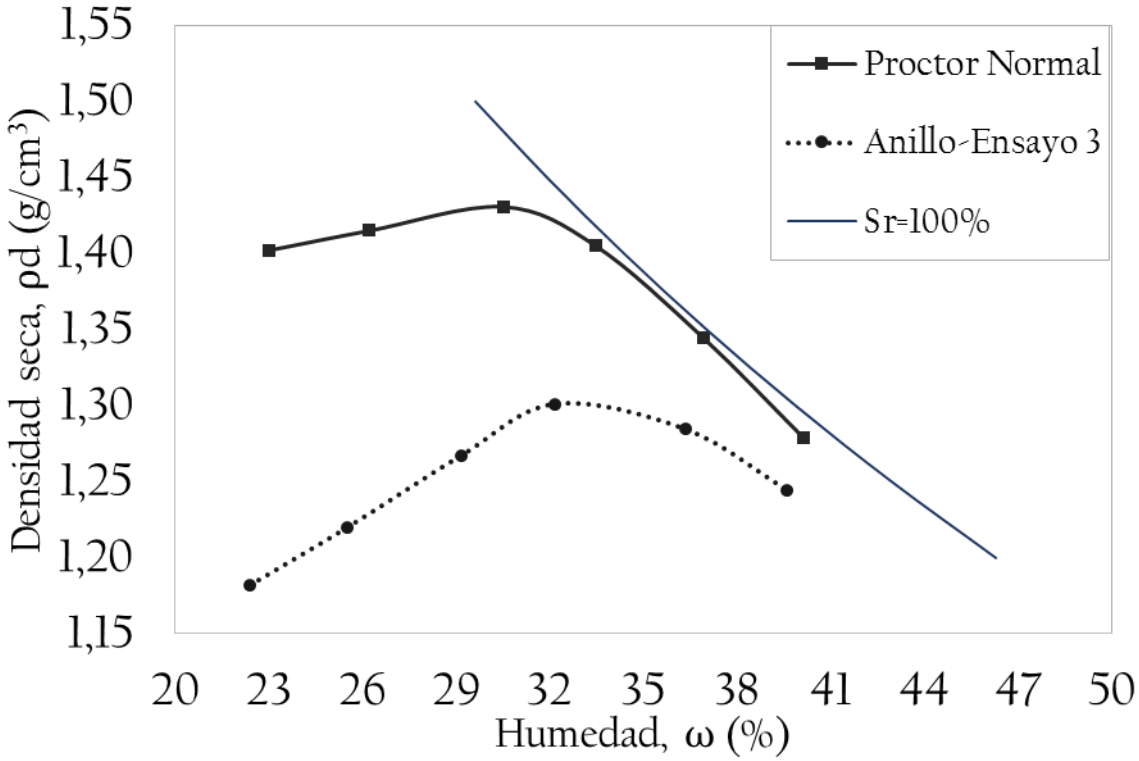


Figura 4.1.3. Curvas de compactacion obtenidas de los ensayos de Proctor normal y compactación con el anillo edométrico.

En la Figura 4.1.3 se comparan las curvas ρ_d-ω_{opt} de las compactaciones dinámicas obtenidas del Proctor Normal y el anillo edométrico. Si bien se realizaron las compactaciones utilizando la misma energía en ambos moldes, la densidad máxima conseguida en el ensayo del PN ha resultado mayor (ρ_d = 1.43 g/cm3) que la alcanzada por la compactación con el anillo edométrico (ρ_d = 1.33 g/cm3), sin embargo, las humedades optimas son relativamente similares; para el PN la humedad optima fue 30.5%, mientras que para la compactación con el anillo varió entre el 32 y el 34%. La diferencia existente entre los valores de densidades conseguidos con un molde u otro, se debe a la fricción generada entre el suelo y las paredes de todo el perímetro interno (diámetro interno) de los moldes, y sabiendo que la fricción es inversamente proporcional al diámetro, ésta será mayor en las compactaciones con el anillo edométrico, lo que conlleva a que no toda la energía suministrada al suelo sea absorbida por éste y dé como resultado una muestra menos densa.

4.2. COMPACTACIÓN ESTÁTICA

Las compactaciones estáticas se realizaron utilizando una prensa automática con control de velocidad y registrando las cargas aplicadas al suelo hasta conseguir las muestras con las condiciones de volumen y densidades deseadas (ver acápite 3.4.1). La Tabla 4.2.1 resume las características de las muestras compactadas estáticamente.

Tabla 4.2.1. Características de las muestras compactadas estáticamente.

Muestra	Ws (g)	Vs (mm^3)	ω (%)	Velc. de carga (mm/seg)	Gs (gr/cm^3)
CE (1,20)	48,99	18144,44	20,40	0,017	2,7
CE (1,22)	49,81	18448,15	25,75		
CE (1,33)	54,30	20111,11	32,12		

Las Figura 4.2.2Figura 4.2.3 Figura 4.2.4 muestran la tensión aplicada directamente a cada una de las muestras durante la compactación en función del índice de poros medido (e, med), es decir, el índice de poros conseguido de la relación entre el volumen de sólidos y el volumen total de la muestra, obtenido a través de un back-análisis partiendo del volumen final conocido. La Figura 4.2.2 contrasta además con los resultados obtenidos por Romero, 1999 en una muestra de humedad similar, donde se puede apreciar que en los resultados de Romero (1999) presenta una menor compresibilidad debido a que el suelo usado es más denso que el de este estudio. El índice de poros calculados (e,cal), se obtuvo mediante la expresión:

$$e_{cal} = e_0 - \lambda_{\sigma v} * \ln \sigma_v \qquad (4.2.1)$$

Siendo e_0 y $\lambda_{\sigma v}$ las variables a determinar de forma que el error entre la e_{cal} y e_0 sea mínimo. La Tabla 4.2.2 muestra un resumen de los valores de e_0 y $\lambda_{\sigma v}$ obtenidos para cada muestra compactada estáticamente en este estudio y los obtenidos por Romero, (1999). La Figura 4.2.1 muestra la evolución de los valores de $\lambda_{\sigma v}$ con el contenido de humedad e índice de poros del suelo construida a partir de los datos de la Tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.2. Resumen valores de e_0 y λ para cada muestra compactada

Muestra	ω (%)	$\lambda_{\sigma v}$	e_0	
CE (1,20)	20,5	0,386	1,84	Estduio actual
CE (1,22)	25,8	0,510	2,00	
CE (1,33)	32,12	0,590	1,68	
CE (1,66)	3	0,162	2,133	Romero, 1999
CE (1,77)	9,8	0,209	2,454	
CE (1,88)	14,7	0,220	2,446	
CE (1,78)	18,7	0,240	2,584	
CE (1,67)	22,3	0,234	2,484	

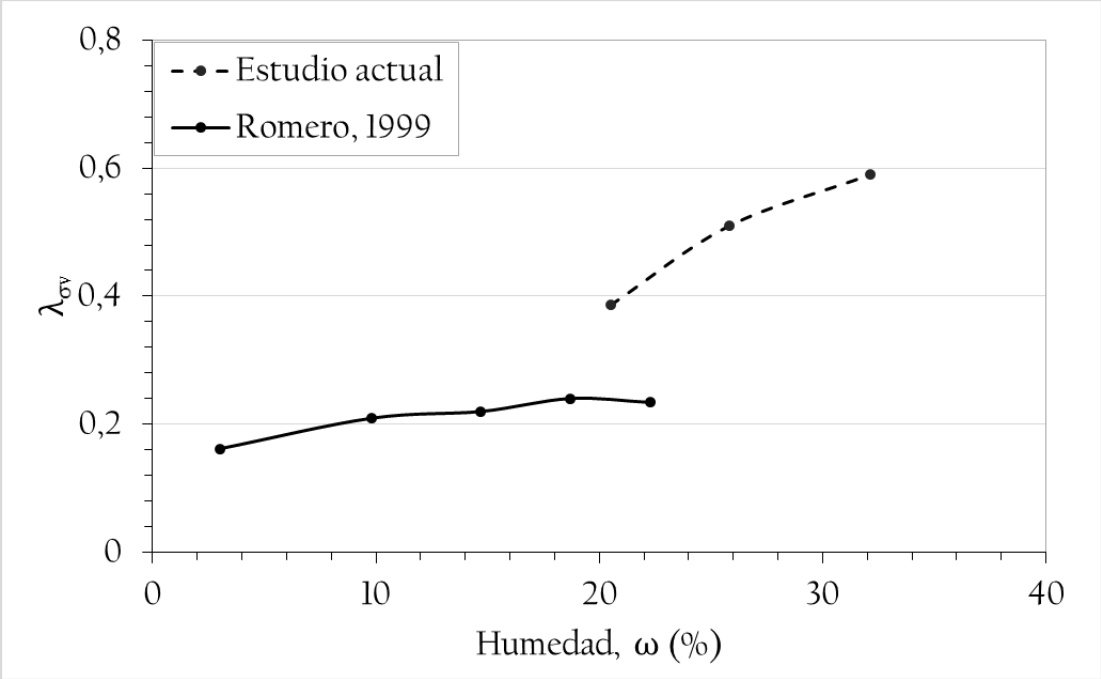


Figura 4.2.1. Valores de $\lambda\sigma_v$ y contenido de humedad de cada muestra estudiada.

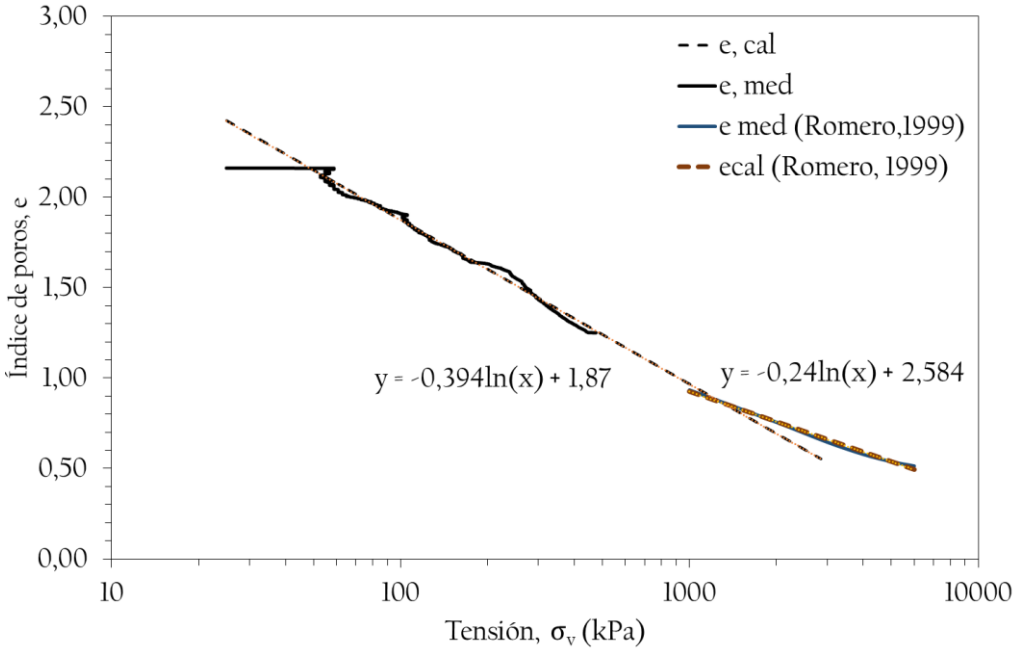


Figura 4.2.2. Índice de poros - tensión vertical de compactación muestra CE (1.20) y resultados de Romero (1999).

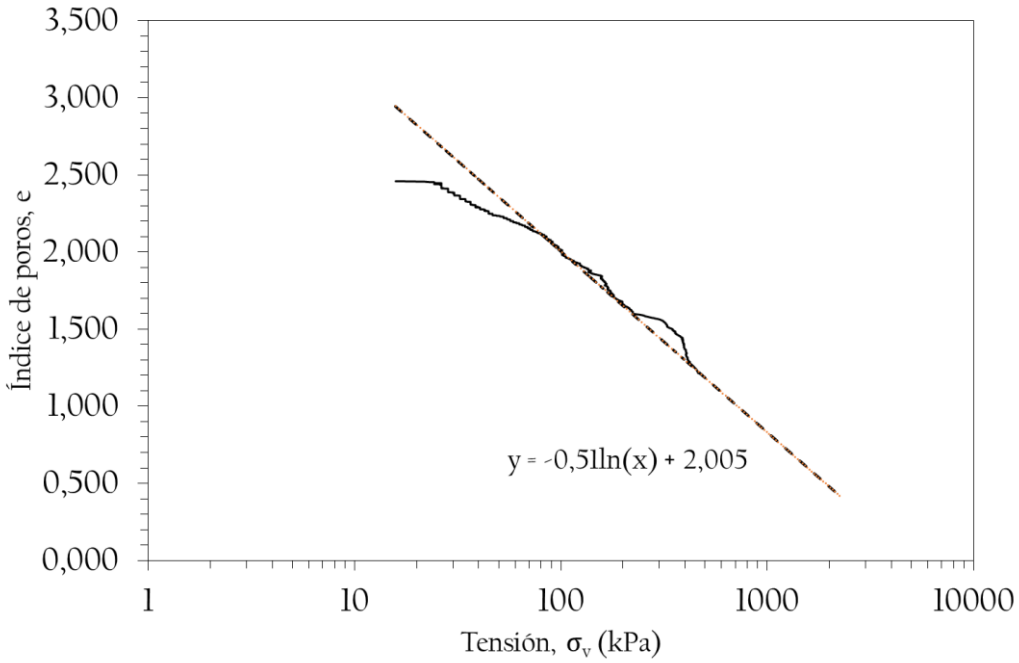


Figura 4.2.3. Índice de poros - tensión vertical de compactación muestra CE (1.22).

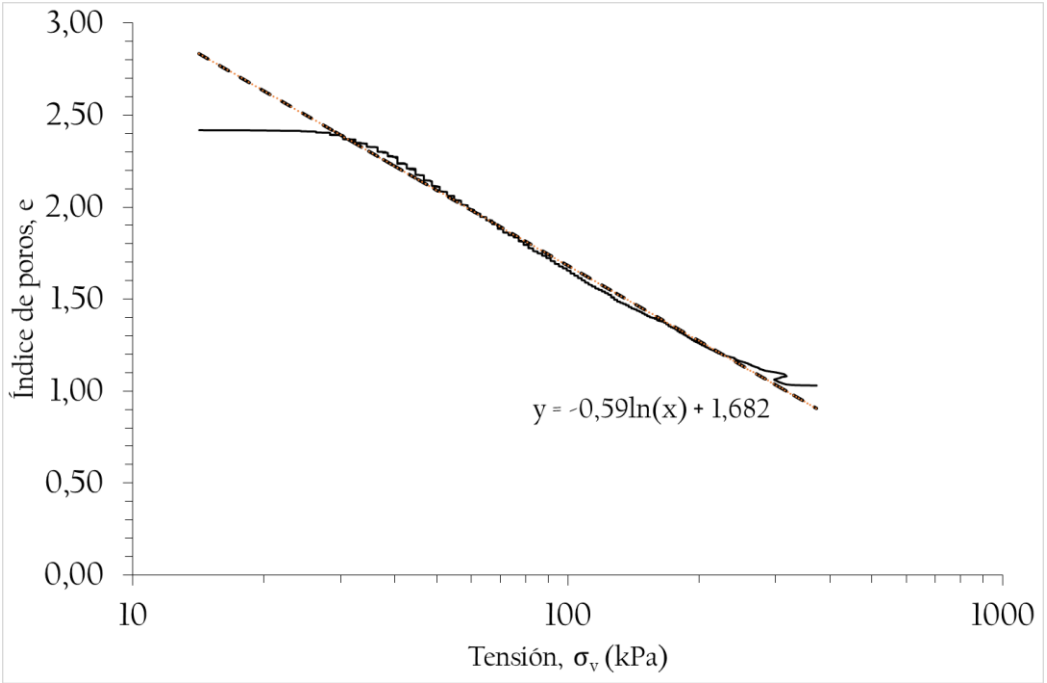


Figura 4.2.4.Índice de poros - tensión vertical de compactación muestra CE (1.33)

La Figura 4.2.5 muestra la curva de tensión vertical aplicada en función de la densidad seca calculada a partir del $e_{cal,}$ para cada muestra compactada CE (1.20), (1.22) y (1.33) con sus humedades de 20.4, 25.75 y 32.12 % respectivamente. Las curvas de línea continua representan los valores medidos, mientras que las líneas punteadas representan valores extrapolados.

Al final de la compactación de la muestra CE (1.33) con una humedad de 32.12 %, se llegó a un Sr= 98% con una tensión aplicada de 400 kPa. Para las muestras más secas CE (1.20) y CE (1.22), al finalizar la compactación se alcanzó un Sr= 44 y 58 % respectivamente, a una tensión de 500 kPa. Las tensiones a la que estas muestras alcanzarían el 100% de la saturación, utilizando las curvas de extrapolaciones, sería de 3000 kPa para la muestra CE (1.20) y una tensión de 1250 kPa para la muestra CE (1.22).

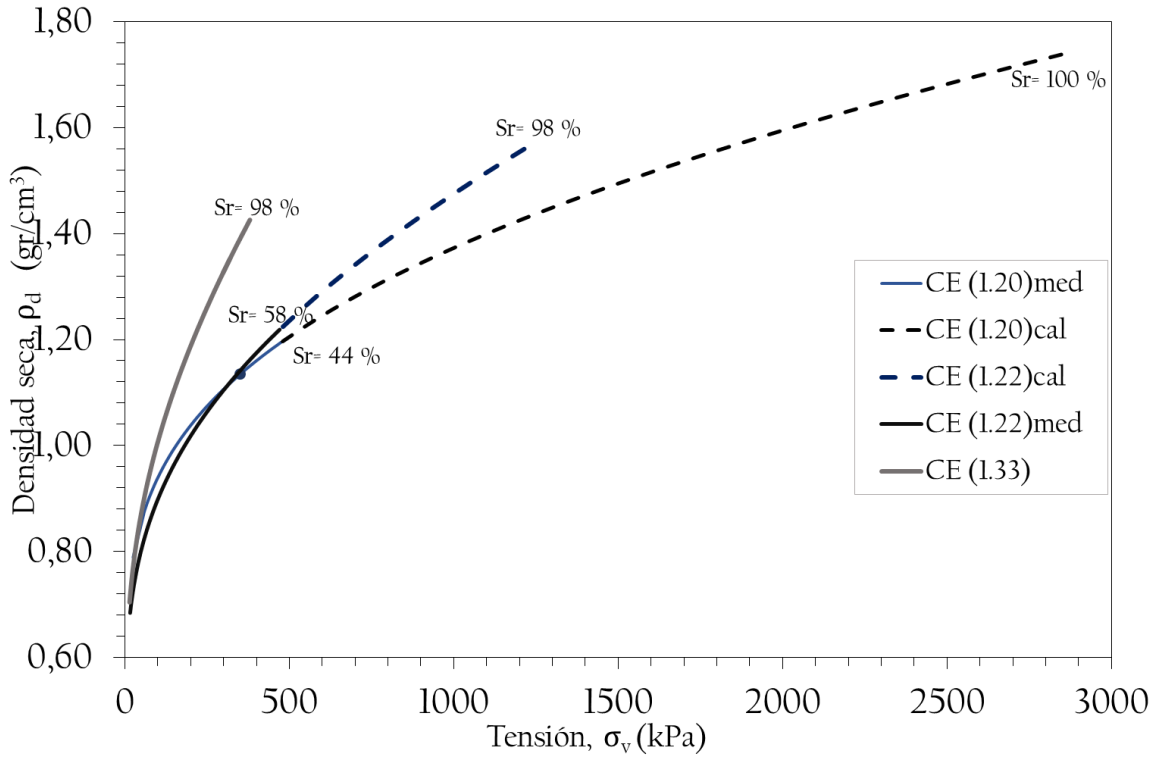


Figura 4.2.5.Tensión vertical contra densidad seca para diferentes contenidos de humedad realizada en este estudio.

La Figura 4.2.6 muestra el mismo grafico sobre el comportamiento tensional en funcion de la densidad seca del suelo anterior adicionando los resultados presentados por Romero (1999), donde se constata que a menor humedad es necesario mayor tensión para lograr que la muestra presente un nivel de saturación total.

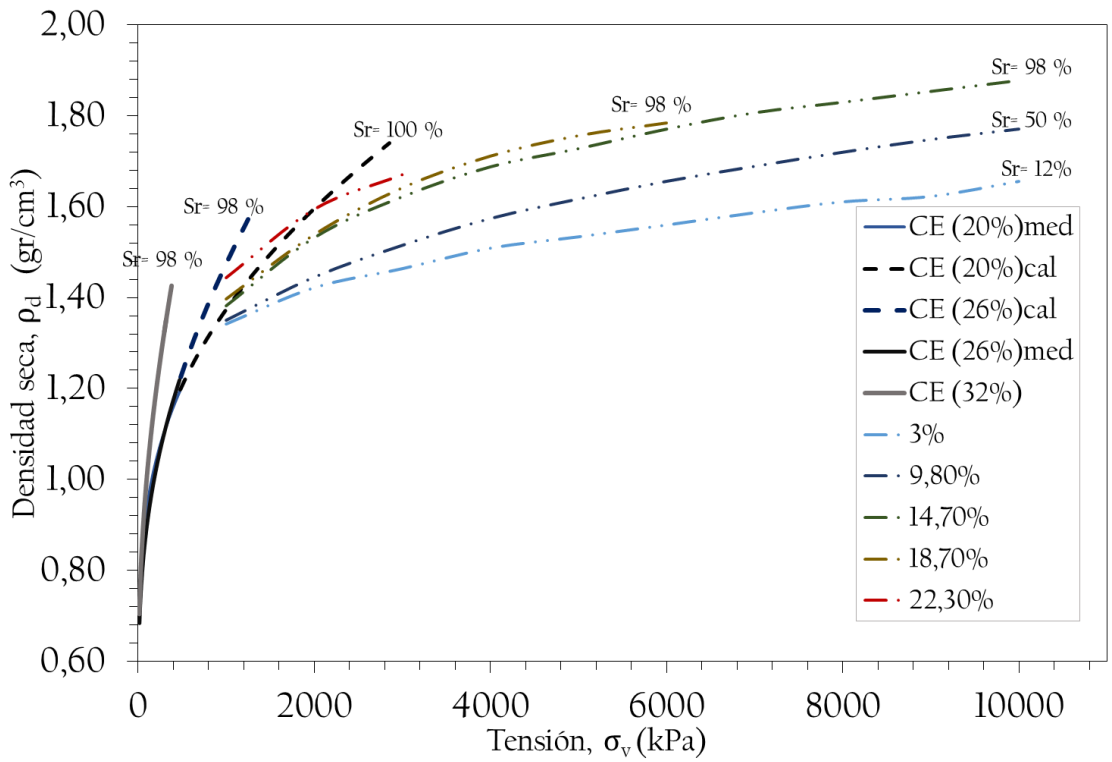


Figura 4.2.6. Tensión vertical contra densidad seca para diferentes contenidos de humedad incluyendo los resultados de Romero (1999).

A fin de comparar las tensiones verticales del ensayo de la compactación estática realizadas a muestras parcialmente saturadas, es decir, succion › 0, con las presiones obtenidas del ensayo de consolidacion isótropa en condiciones saturada (ver Figura 4.2.7), se puede utilizar la expresión 4.2.2, se obtiene K_0. Romero (1999), establece valores de K_0 en función del grado de saturación y un valor razonable que envuelve los rangos de saturación en este estudio sería un K_0 = 0.4.

$$\boldsymbol{p = \sigma_v(1 + 2ko)/3} \qquad (4.2.2)$$

Las Figura 4.2.8 Figura 4.2.9 muestran las curvas de indice de poros *e*, conta la tensión media *p*, tanto para el proceso de compactación (utilizando un valor de K_0 de 0.4) como para el de consolidación realizado en el equipo triaxial. En estas figuras se puede apreciar que la pendiente de la curva de compresión de la compactación esmayor que la pendiente de la curva saturada durante la consolidación. Esta

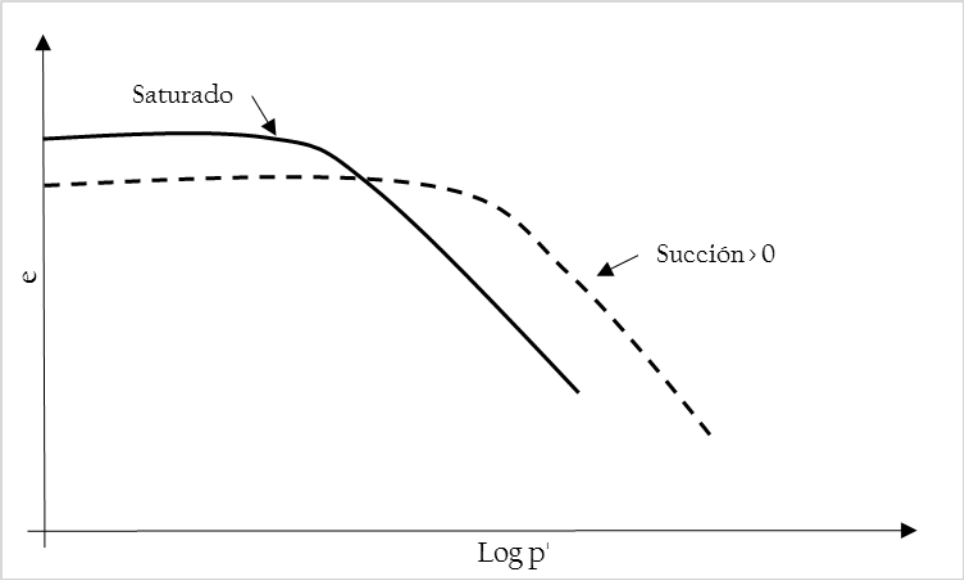


Figura 4.2.7. Esquema curvas de compresión para suelo saturado y no saturado.

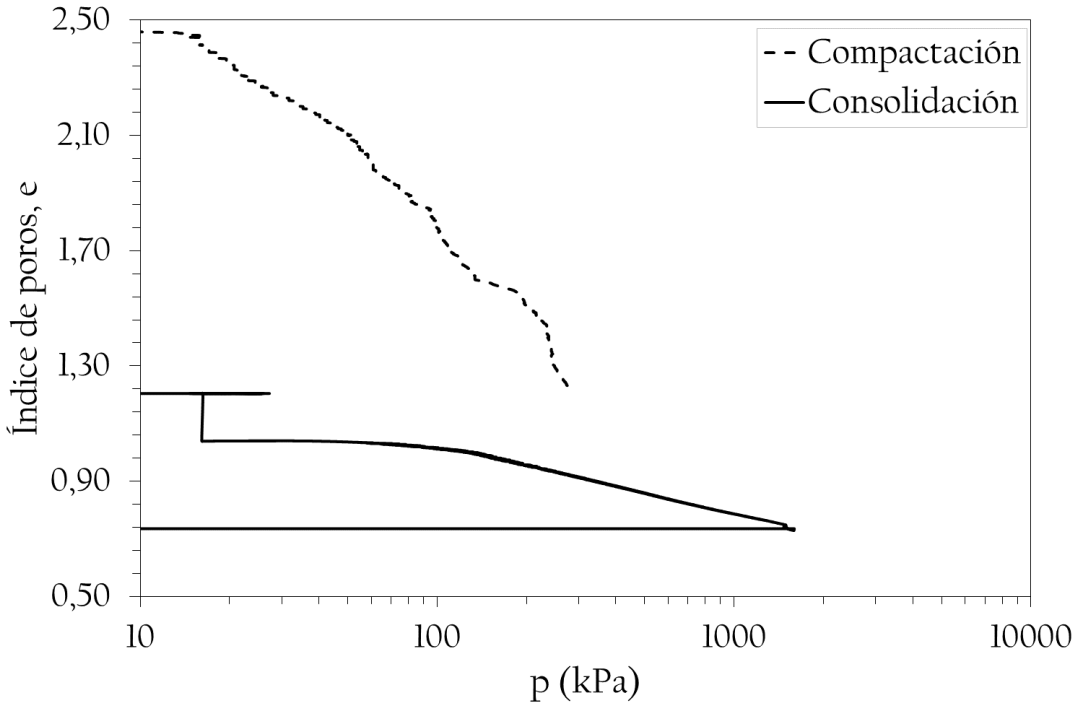


Figura 4.2.8. Valores de índice de poros y tensión media, p, durante los procesos de CE y consolidación. Muestra CE (1.22).

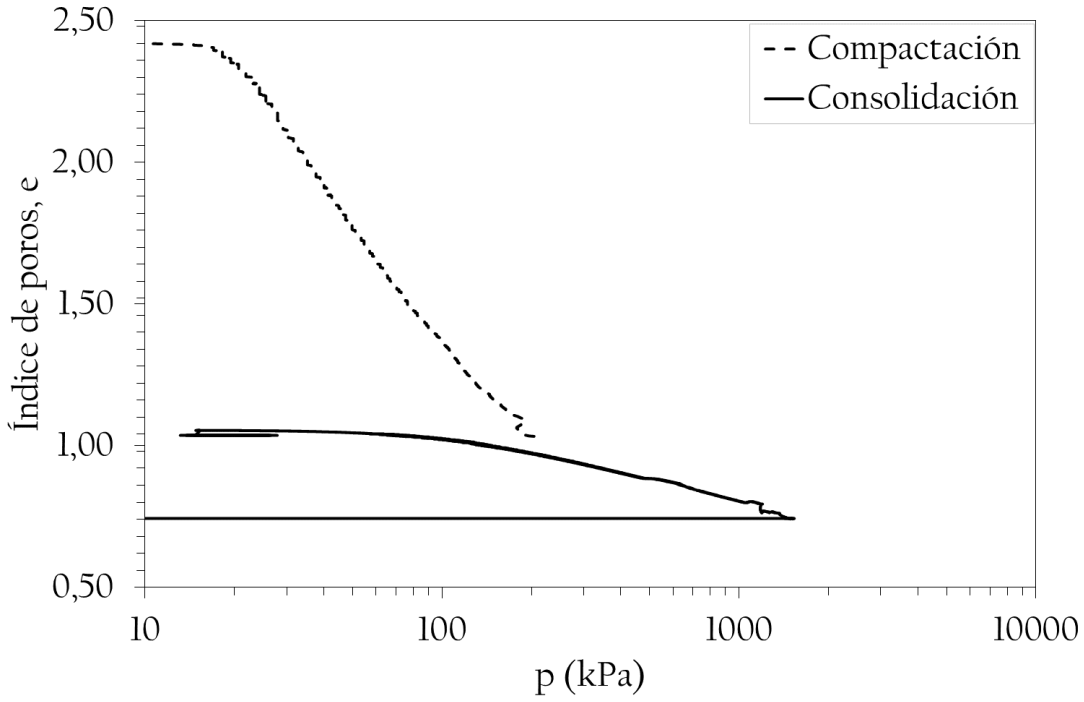


Figura 4.2.9.Valores de índice de poros y la tensión media, p, durante los procesos CE y consolidación. Muestra CE (1.33).

4.3. MEDIDAD DE SUCCIÓN

Las medidas de la succión total se realizaron con el equipo psicrómetro de punto de rocío modelo WP4-T (ver Figura 3.4.16), el cual permitió medir la succión total de las muestras. La Tabla 4.3.1 muestra un resumen de las características de las muestras y la succión total medida en cada una de ella (dos veces). Los valores de la succión total obtenidos en las dos medidas son relativamente similares variando entre 0.01 y 0.2 MPa. La succión en las muestras compactadas dinámicamente son iguales entre sí (0.9MPa), pero ligeramente menores que la succión de las muestras compactadas estáticamente (1.04MPa).

Tabla 4.3.1. Valores obtenidos de las medidas de succión de las muestras compactadas.

ω (%)	Tipo compactación	Succión, Ψ, (MPa)		ρ_d (g/cm^3)
26	CD	0,91	1,14	1,22
26	CE	1,04	1,08	1,33
32	CD	0,90	0,92	1,22
32	CE	1,00	1,08	1,33

La Figura 4.3.1 muestra los valores de la succión obtenidos de las muestras en relación a la humedad de las mismas. Las muestras más húmedas presentan menor succión que las

más secas, sin embargo, según los datos obtenidos en este estudio, independientemente de la humedad las succiones han resultado casi iguales.

Romero (1999), presentó valores de succión matricial para suelos con las características aquí estudiadas (densidades secas de 1.22 y 1.33 gr/cm^3 y humedades de 26 y 32 %) de 0.2 y 0.04 MPa respectivamente, y establece que el valor de la succión osmótica puede considerarse del orden 0.4 MPa, lo que genera una succión total de 0.6 y 0.44 MPa para cada muestra.

La Figura 4.3.2 presenta un plano densidad seca-contenido de humedad, en el cual se han colocado los puntos que representan las muestras de este estudio y algunos puntos de los estudiados por Romero (1999) a una densidad seca mayor (considerando la succión total con una succión osmótica de 0.4 MPa), en la cual se puede apreciar que los valores de succiones obtenidos en este estudio son mayores a los de Romero.

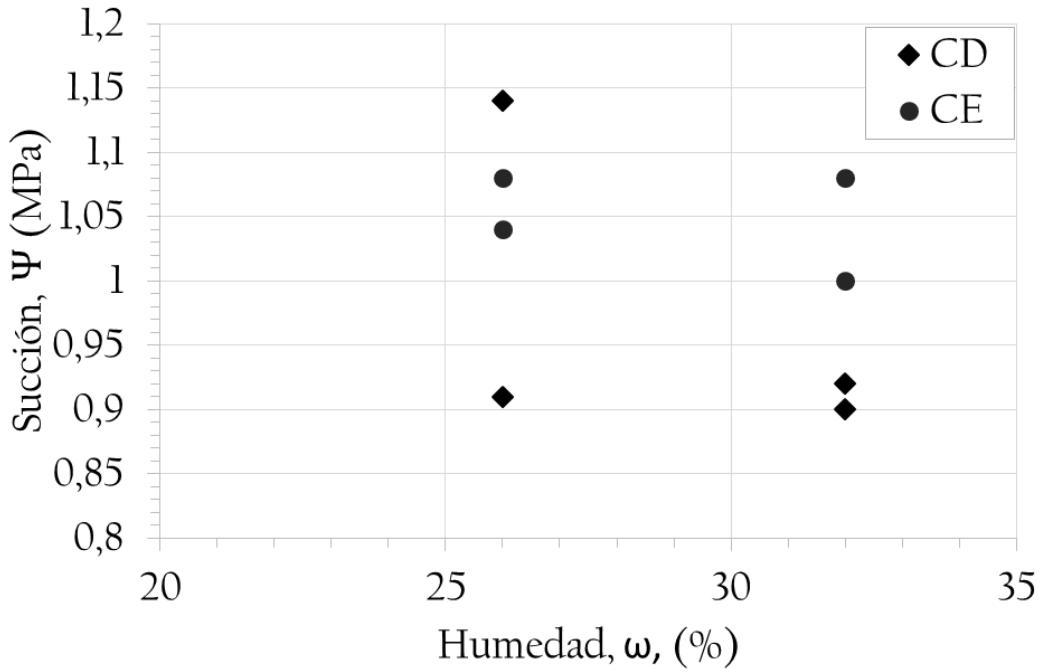


Figura 4.3.1. Valores de succión total medidos en el psicrómetro de rocío relacionadas con la humedad de las muestras compactadas.

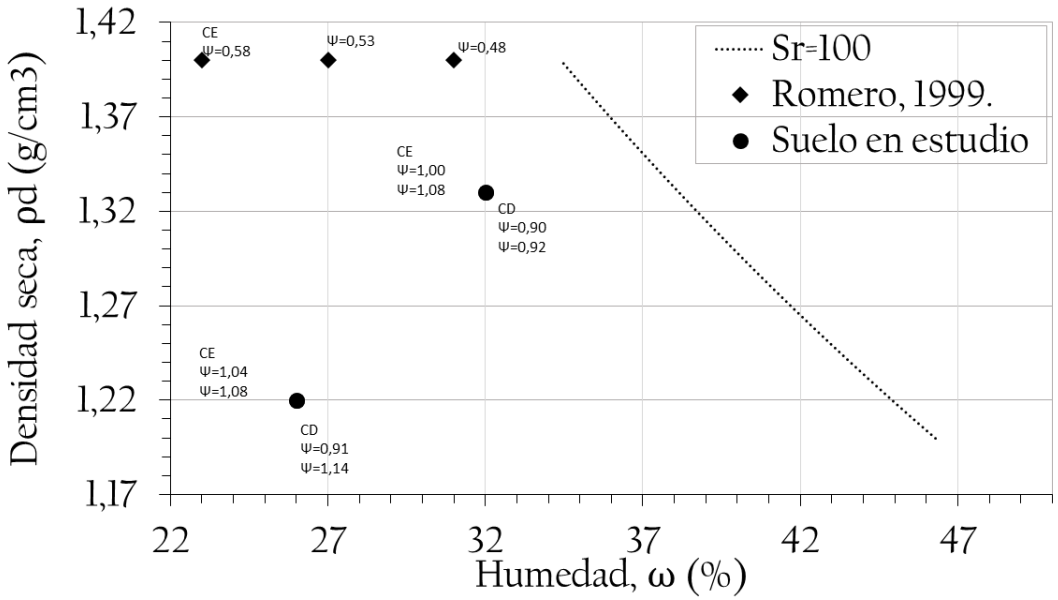


Figura 4.3.2. Densidad seca - humedad con los valores de succión total obtenidos en las muestras estudiadas.

4.4. PERMEABILIDAD SATURADA

La Tabla 4.4.1 muestra un resumen de los valores de la permeabilidad de las muestras calculadas a través del caudal de agua entrante a la muestra. Así también en la tabla se indican las condiciones de las muestra tanto iniciales como las saturada en donde se midieron las permeabilidades.

La Figura 4.4.1 muestra los valores de la permeabilidad obtenidos para cada muestra ensayada en relación al índice de poros, tanto para las muestras compactadas dinámica como estáticamente, donde resultó que las permeabilidades para las muestras de densidad seca ρ_d = 1.22 gr/cm^3 resultaron mayores a las de densidad seca ρ_d = 1.33 gr/cm^3 independientemente del tipo de compactación. En la figura se muestra también valores de permeabilidades obtenidas por Romero (1999), para índices de poros menores a los de las muestras de este estudiadas, por lo que las permeabilidades obtenidas por Romero resultan menores.

Deng et al. (2011), indica que la permeabilidad puede ser calculada con la expresión 4.3.1, conocido el valor del índice de poros. En la Figura 4.4.1 se muestran las permeabilidades calculadas con la expresión propuesta por Deng et al, con los índices de poros de las muestras de éste estudio. En la figura se aprecia que las permeabilidades obtenidas con la expresión 4.3.1 resultan del orden mayor a las obtenidas en el estudio actual y en Romero, 1999.

$$k = 0{,}09 * 10^{4{,}1e} * 10^{-12} \qquad (4.3.1)$$

Tabla 4.4.1. Resumen de los valores de las permeabilidades de las muestra ensayadas.

Muestra	Condiciones iniciales				Permeabilidad, k, (m/s)	Condiciones saturadas	
	ωo (%)	ρ_d (g/cm^3)	eo	Sr		el	ρ_d (g/cm^3)
CD-26	26,3	1,22	1,21	0,632	4,39E-10	1,38	**1,26**
CD-32	32,6	1,32	1,05	0,828	1,40E-10	1,21	**1,21**
CE-26	25,5	1,22	1,20	0,564	8,71E-10	1,24	**1,32**
CE-32	32,4	1,33	1,04	0,810	1,27E-10	1,26	**1,31**

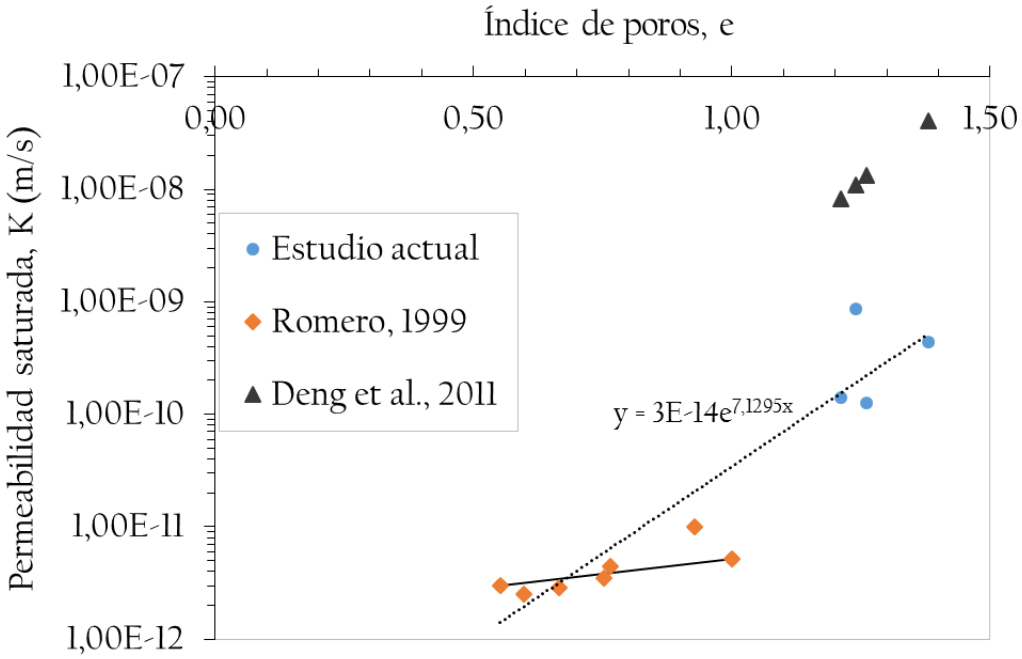


Figura 4.4.1. Permeabilidad saturada en función del índice de poros.

4.5. COMPRESIBILIDAD ANTE CARGA

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de consolidación realizados con el equipo triaxial, disponible en el laboratorio, (ver Figura 3.4.10). La Tabla 4.5.1 muestra un resumen de las condiciones de las muestras en cada una de las etapas del ensayo de consolidación. Las diferentes muestras fueron sometidas a las mismas variables de carga de confinamiento, presión de cámara y de cola, y mismas cargas de consolidación explicadas en el apartado 3.4.2. La presión de preconsolidación se determinará a utilizando los tres diferentes métodos explicados en el apartado 3.4.2.

Tabla 4.5.1. Resumen de las condiciones iniciales, saturadas y finales de las muestras sometidas a consolidación.

Muestra	Condiciones iniciales				Fainal de saturación		Final consolidación			
	ωo (%)	ρ_d (g/cm^3)	e_i	Sr	ρ_d (g/cm^3)	e_1	ωo (%)	ρ_d (g/cm^3)	e_2	Sr
CD (1,22)	26,30	1,22	1,21	0,63	1,13	1,38	29,50	1,33	1,03	1,00
CD (1,32)	32,60	1,32	1,05	0,83	1,21	1,23	31,47	1,46	0,85	1,00
CE (1,22)	25,50	1,22	1,20	0,56	1,21	1,24	27,50	1,39	0,94	1,00
CE (1,33)	32,40	1,33	1,04	0,51	1,20	1,26	27,52	1,39	0,95	1,00
CD (1,18)	32,50	1,18	1,29	0,87	1,18	1,29	29,50	1,50	0,80	1,00

La Figura 4.5.1 muestra las curvas de consolidación de todas las muestras ensayadas, compactadas dinámica y estáticamente. En estas curvas es apreciable las etapas tanto de saturación, donde ocurren deformaciones volumétricas asociadas a la estructura de las muestras al ser compactadas, como las etapas de consolidación, donde se puede ver el cambio de pendiente que corresponde a la presión de preconsolidación. En todos los ensayos las presiones de poros superaron el valor límite esperado de 40 kPa, entendiendo que la velocidad de aplicación de la carga fue bastante rápida.

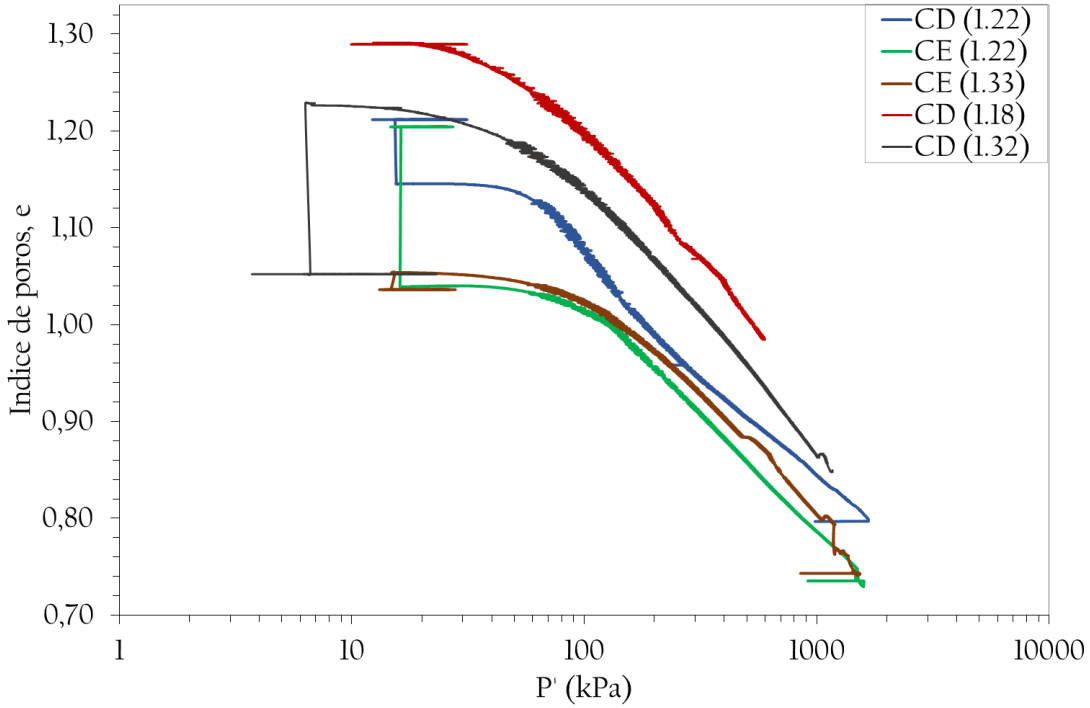


Figura 4.5.1. Curva de consolidación de todas las muestras ensayadas.

De la Figura 4.5.2 a la Figura 4.5.7 se muestran las curvas de consolidación de las muestras contrastadas entre ellas por el tipo de compactación, humedad y densidad seca. En las curvas se puede apreciar la variación del índice de poros e, en función de la tensión media efectiva p' durante el proceso de consolidación. Las tensiones máximas alcanzadas fueron entre 1160 y 1670 kPa.

En la Figura 4.5.2 y Figura 4.5.3 se muestran las curvas de consolidación de las muestras con igual tipo de compactación pero distinta densidad seca y contenido de humedad (ver Tabla 4.5.1).

Las Figura 4.5.4Figura 4.5.5Figura 4.5.6 muestran las curvas de consolidación de las muestras con análogas densidades secas, pero diferente forma de compactación. La Figura 4.5.7 muestra las curvas de las muestras con igual contenido de humedad y diferentes densidades secas y forma de compactación.

A partir de la curva de consolidación de cada muestra (Figura 4.5.1) se determina el valor de la presión de preconsolidación utilizando los métodos descritos en el apartado 3.4.2. La Tabla 4.5.2 muestra un resumen de las presiones de preconsolidación obtenidos por los diferentes métodos resultando mayores los valores de preconsolidación de las muestras compactada de forma estática. También se muestra el valor del índice de compresión (λ) obtenido para cada muestra.

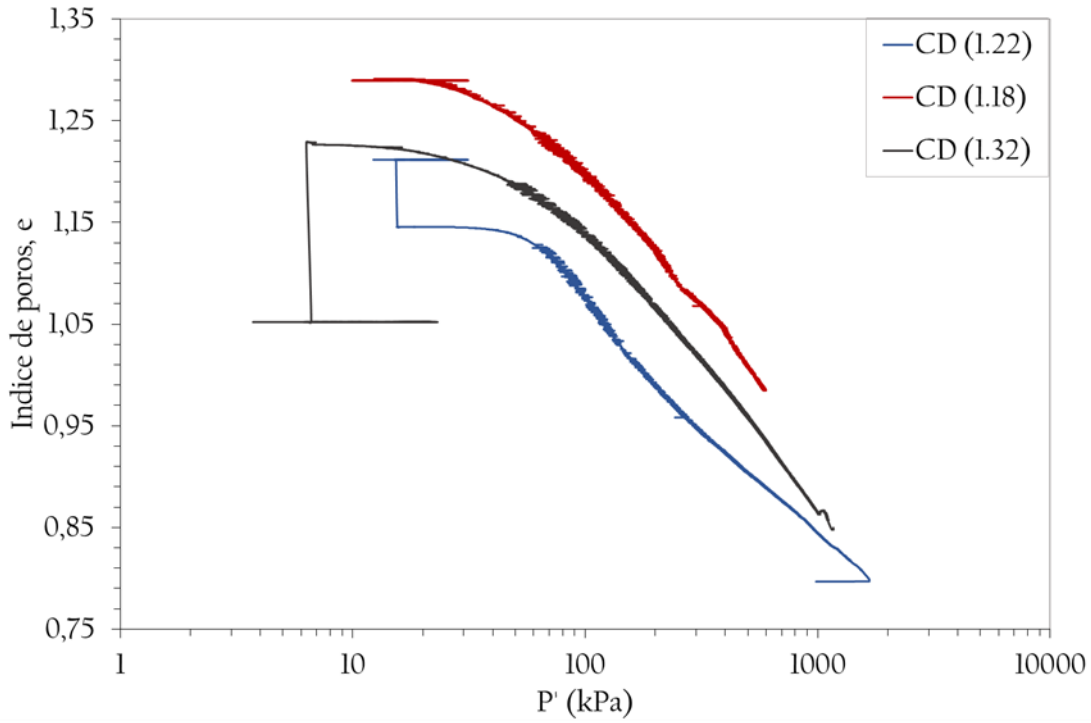


Figura 4.5.2. Curva de consolidación de las muestras compactadas dinámicamente.

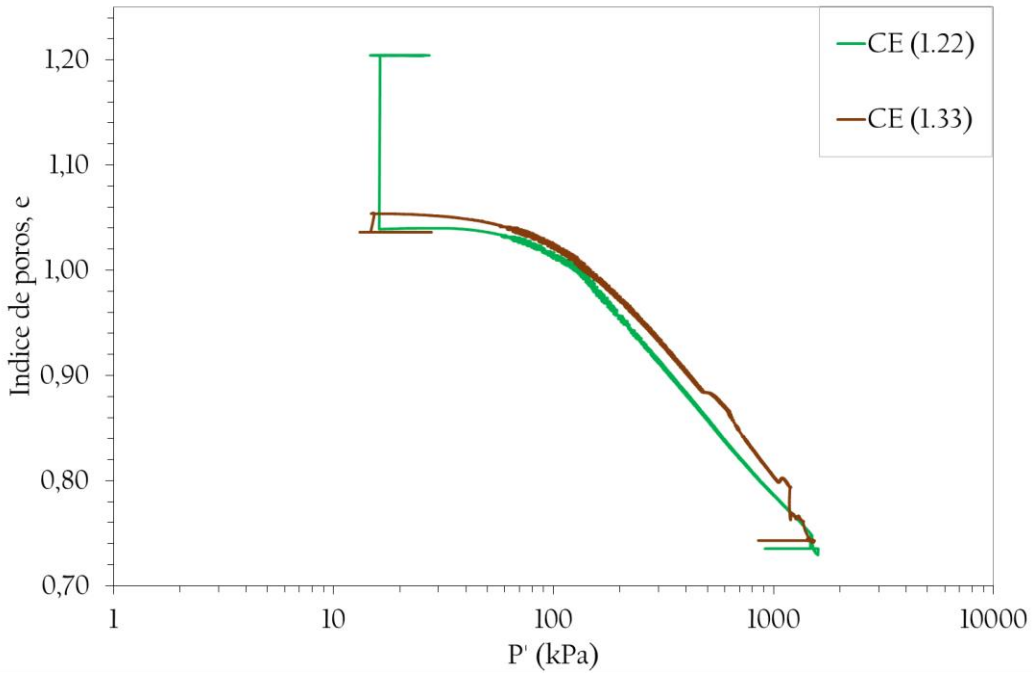


Figura 4.5.3. Curva de consolidación de las muestras compactadas estáticamente.

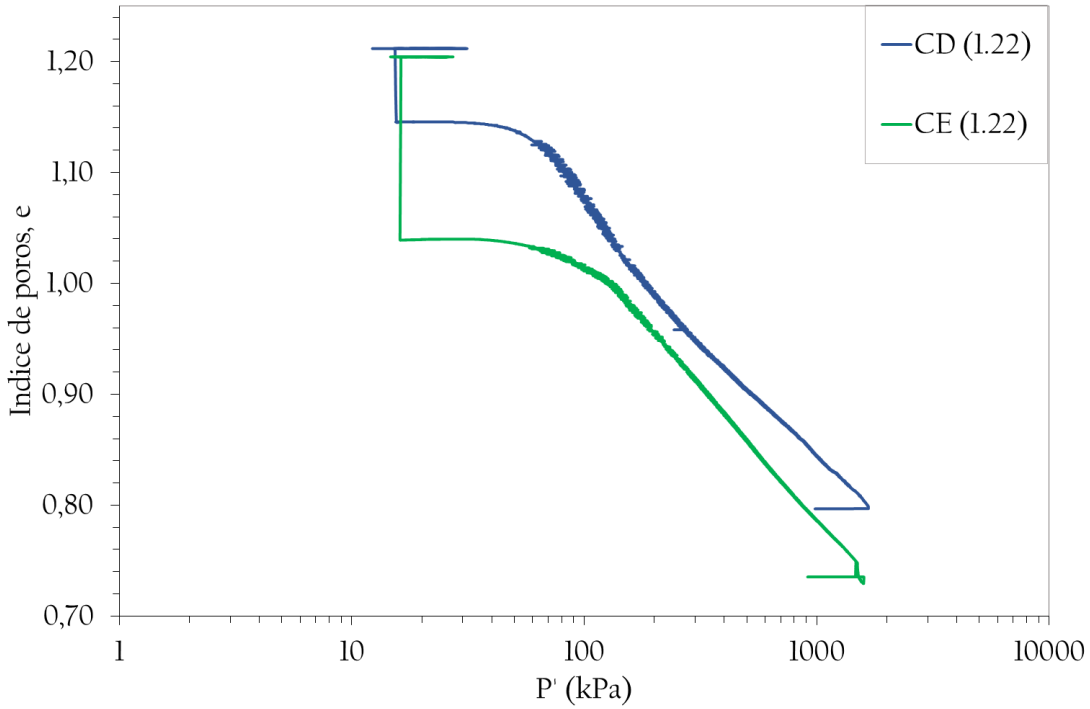


Figura 4.5.4. Curva de consolidación de las muestras con igual densidad seca y contenido de humedad compactadas dinámica y estáticamente.

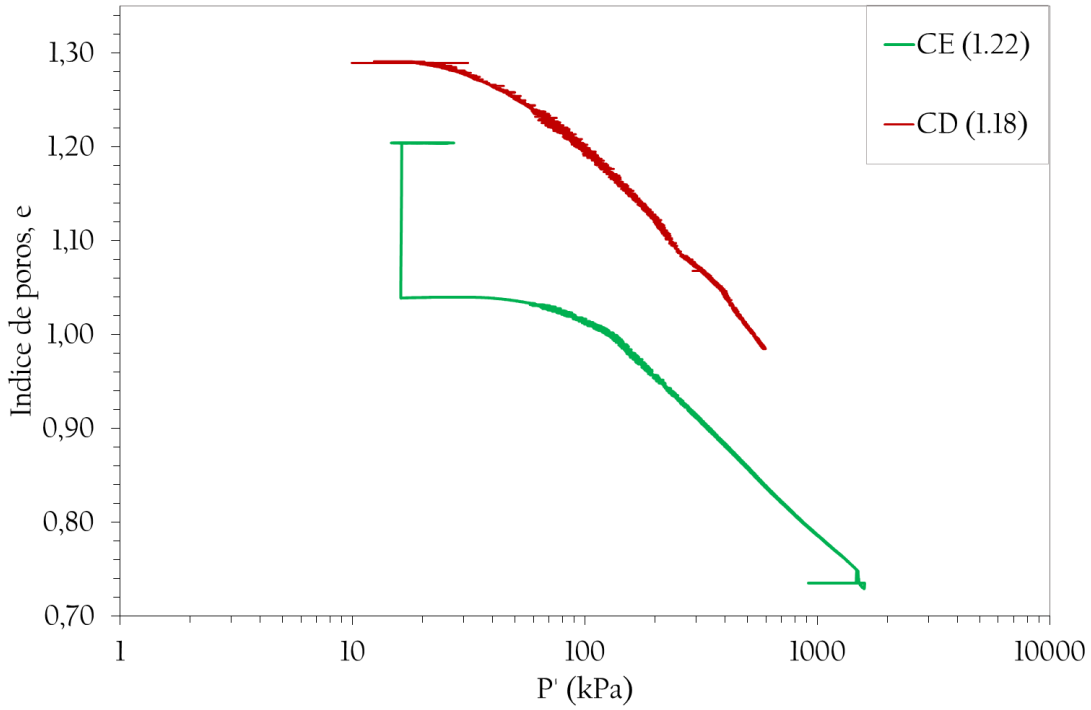


Figura 4.5.5Curva de consolidación de las muestras con similar densidad seca y diferente contenido de humedad, compactadas dinámica y estáticamente.

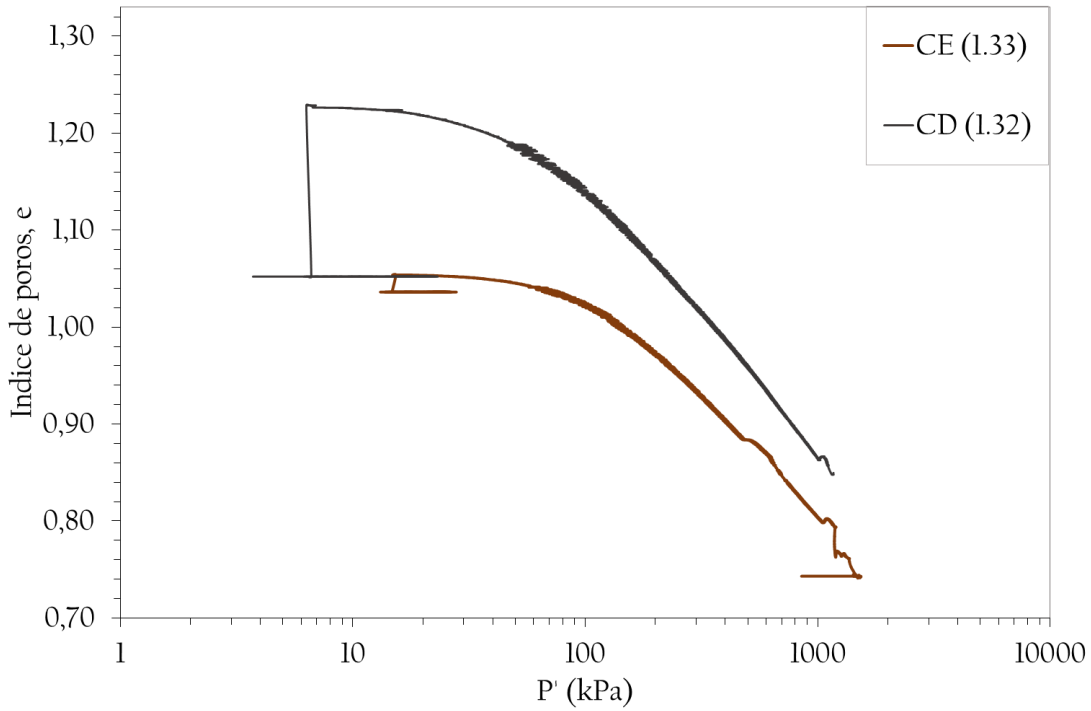


Figura 4.5.6. Curva de consolidación de las muestras con igual densidad seca y contenido de humedad, compactadas dinámica y estáticamente.

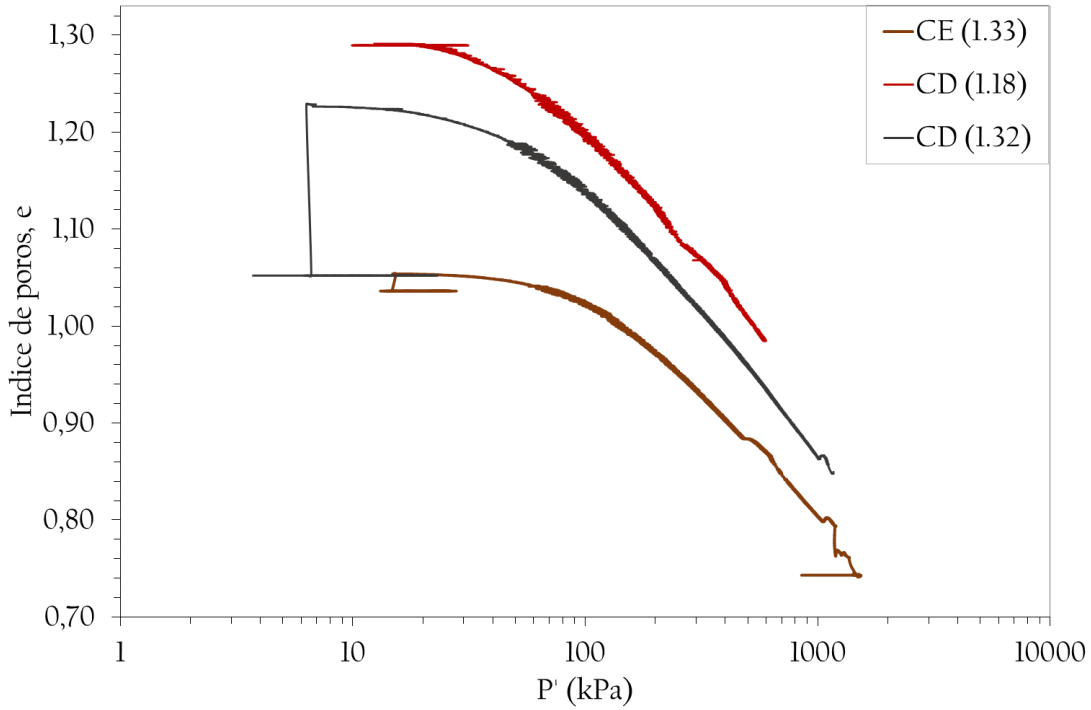


Figura 4.5.7. Curva de consolidación de las muestras con diferentes densidad seca e igual contenido de humedad, compactadas dinámica y estáticamente.

Tabla 4.5.2. Resumen los valores de presión de pre consolidación de las muestras ensayadas.

Muestra	Presión preconsolidacion P_o (kPa)			Índice de compresión (λ)	ρ_d (g/cm3)	ω (%)
	Método Casagrande	Método Pacheco Silva	Método Becker			
CD (1,22)	60	62	55	0,262	1,22	26,30
CD (1,32)	85	85	60	0,260	1,32	32,60
CE (1,22)	115	110	95	0,240	1,22	25,43
CE (1,33)	145	135	113	0,232	1,33	32,44
CD (1,18)	62	60	60	0,251	1,18	32,50

4.6. CAMBIOS VOLUMETRICOS DURANTE LA SATURACIÓN

Las condiciones de densidades secas, humedades y los cambios de volumen sufrido por las muestras se resumen en la Tabla 4.6.1.

La Figura 4.6.1 muestra el plano densidad seca – contenido de humedad, en éste se puede apreciar los puntos que representan cada una de las muestras estudiadas. Se muestra también las curvas de saturación desde Sr=0.5 hasta Sr=1. Así también las curvas que, según los resultados obtenidos, delimitan las zonas de cambios de volumen tanto de colapso como de hinchamiento en función de la densidad seca y la humedad. La Figura 4.6.2 de Romero (1999), muestra estas zonas de cambios de volumen esta vez en

función de la tensión vertical y la densidad seca inicial. Al colocar los puntos que representan las muestras estudiadas aquí, los resultados con análogos a los de la Figura 4.6.1. Las muestras con densidades secas y contenidos de humedad menores, CE (1.22) y CD (1.22) presentaron colapso durante el proceso de saturación, mientras que las muestras con mayores densidades secas y contenidos de humedad CE (1.33) y CD (1.32) han hinchado. La muestra CD (1.18) de humedad alta pero densidad baja, prácticamente no mostró cambios de volumen.

Tabla 4.6.1. Resumen de los cambios de volumen de las muestras durante la etapa de saturación bajo presión isotrópica constante de 30 kPa.

Muestra	Humedad, ω(%)	Densidad seca inicial ρ_d (g/cm^3)	Densidad seca saturada ρ_d (g/cm^3)	Deformación Volumétrica	
CD (1,22)	26,30	1,22	1,26	0,03	Hinchamiento
CD (1,32)	32,60	1,32	1,21	-0,09	Colapso
CE (1,22)	25,43	1,22	1,32	0,07	Hinchamiento
CE (1,33)	32,44	1,33	1,31	-0,01	Colapso
CD (1,18)	32,50	1,18	1,18	0,00	Hinchamiento

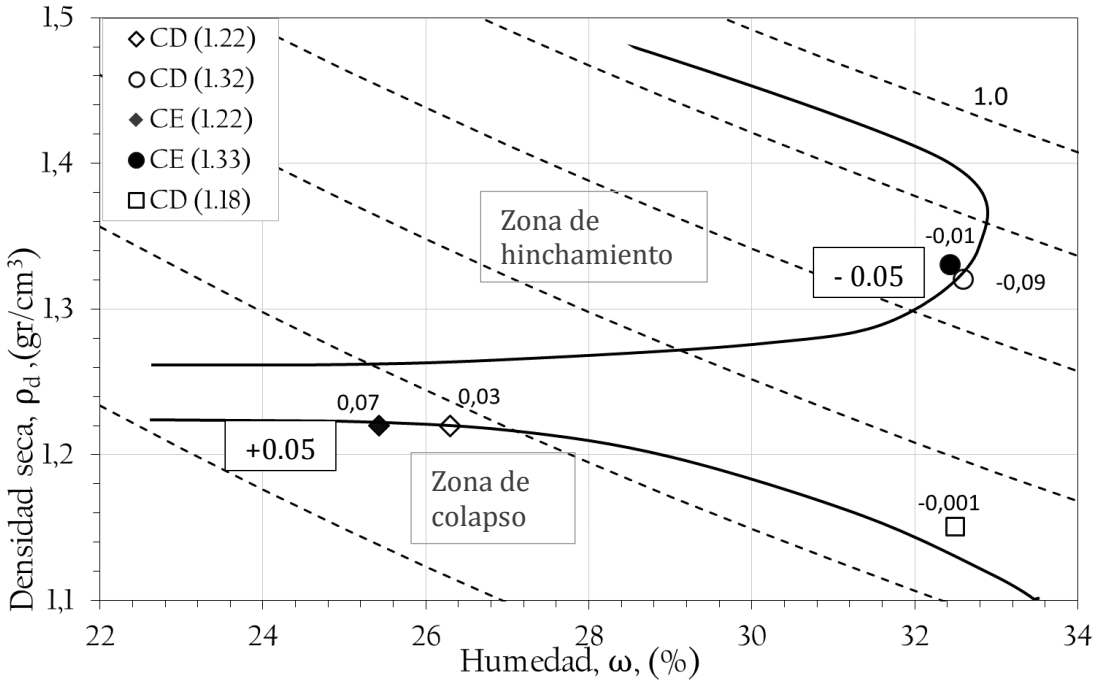


Figura 4.6.1. Plano densidad seca y contenido de humedad de las muestras estudiadas.

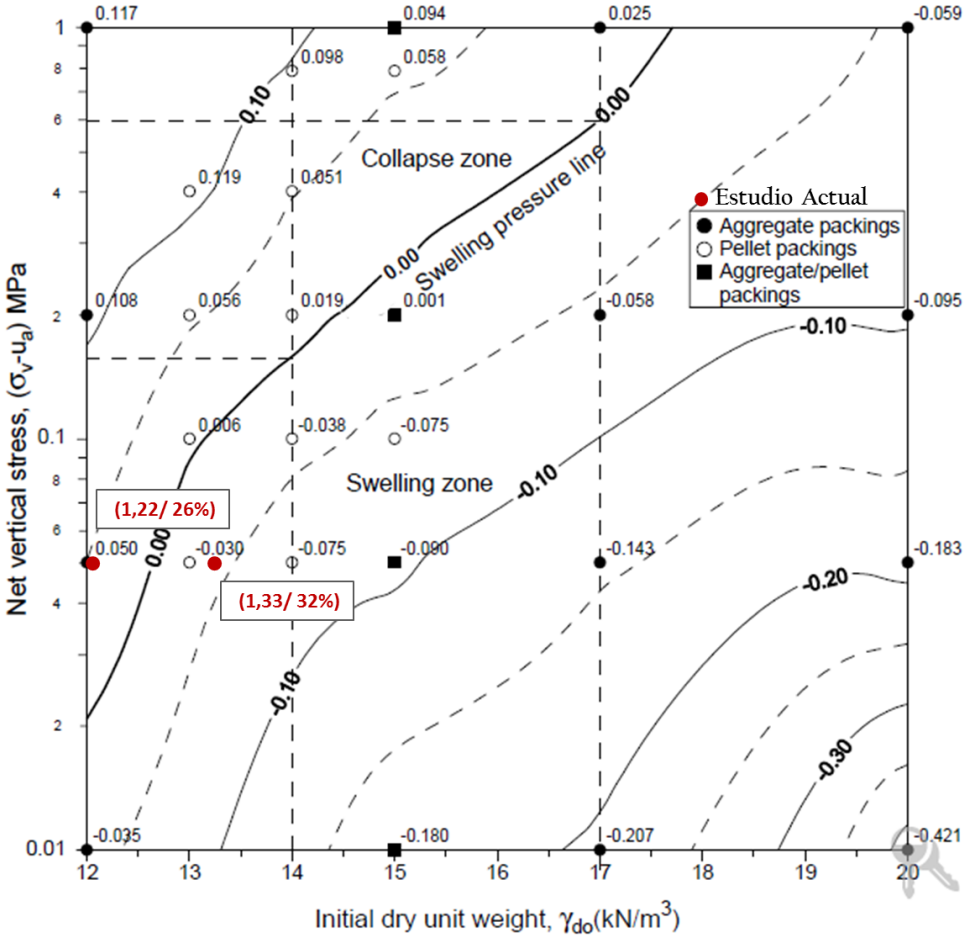


Figura 4.6.2. Densidad seca inicial en función de la tensión vertical (Romero, 1999).

4.7. RELACIÓN CARGA – ENERGÍA DE COMPACTACIÓN

En este apartado, se muestran los resultados de la relación y comparación entre la energía suministrada al suelo en ensayos de compactación dinámica con la carga aplicada durante la compactación estática.

$$E = \int \sigma \, d\varepsilon$$

$$d\varepsilon = -\frac{de}{1+ei};\ e = a - \lambda ln\sigma\ ;\ de = -\frac{\lambda}{\sigma}d\sigma$$

$$E = \int d\sigma \frac{\lambda}{(1+ei)} = \frac{\lambda}{(1+ei)} \qquad (4.7.1)$$

La relación entre la energía y la carga viene dada por la expresión 4.7.1., con la cual se calcula la energía suministrada en función de la tensión vertical de compactación. La Figura 4.7.1 muestra las líneas de la energía en relación a la tensión de compactación a densidad seca y humedad constantes. Las líneas puteadas representan los resultados obtenidos en este estudio, mientras que las líneas continuas representan los resultados de Romero (1999).

La Tabla 4.7.1 muestra los valores de las características de cada muestra, humedad inicial, densidad seca, índice de poros inicial. Así también, se muestran los valores de las tensiones de compactación equivalentes a la energía de PN y PM para cada muestra.

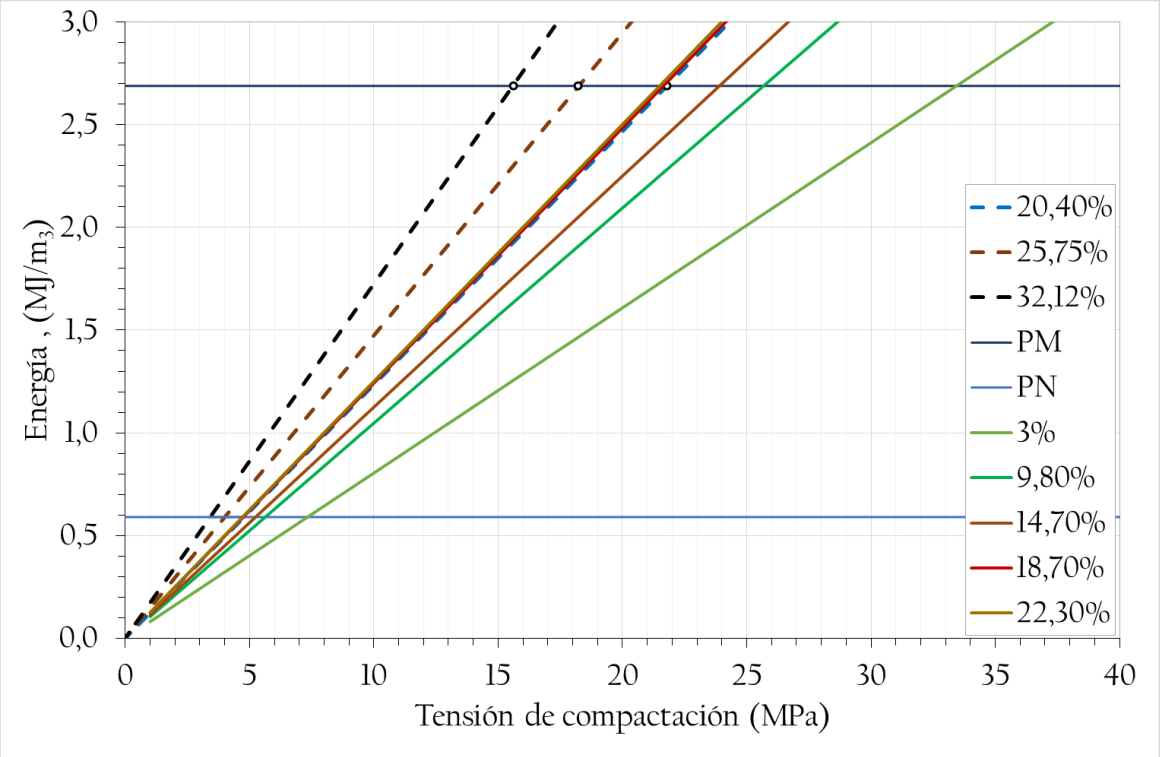


Figura 4.7.1. Relación energía -tensión de compactación.

Tabla 4.7.1. Resumen de las tensiones equivalentes a la energía de PN y PM para cada muestra.

Muestra	λ_{ov}	e_i	ω (%)	σ_{PN} (MPa)	σ_{PM} (MPa)
CE (1,20)	0,39	2,16	20,4	3,4	15,61
CE (1,22)	0,51	2,46	25,74	4,0	18,2
CE (1,33)	0,59	2,42	32,12	4,8	21,8

La Figura 4.7.2 Muestra las curvas de compactación estática para diferentes niveles de tensión de compactación. Se presentan los resultados obtenidos en éste estudio (marcadores rellenos) conjuntamente con los resultados obtenidos por Romero (1999). En el estudio actual se realizaron análisis a muestras de densidades 1.20, 1.22 y 1.33 gr/cm3 con humedades de 20, 26 y 32 % respectivamente a tensiones desde 0.15 a 1 MPa. Romero, estudió muestras con densidad seca mínima de 1.33 gr/cm^3 a tensiones entre 1 y 10 MPa. Los resultados obtenidos por Romero y en este estudio resultaron ser congruentes ya que para la tensión de 1 MPa los valores en ambos estudios fueron análogos.

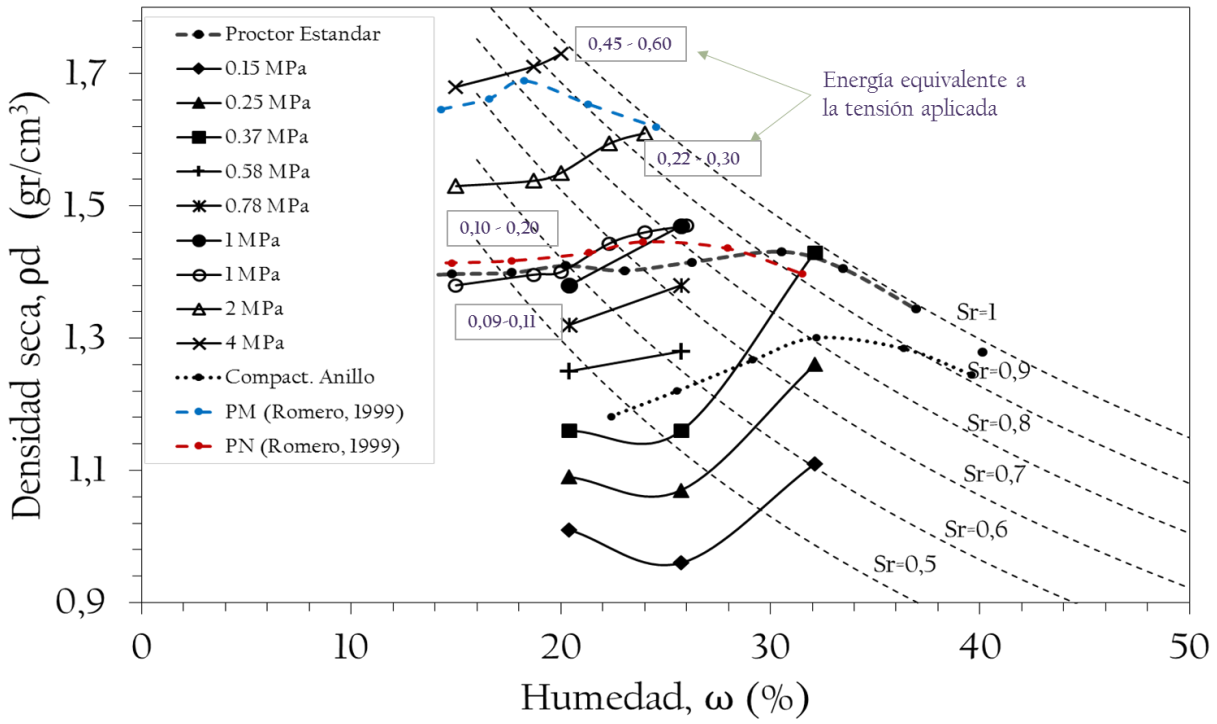


Figura 4.7.2. Cuevas de compactación estática para diferentes niveles de tensión y curvas de compactación dinámica para PN y PM.

En la Figura 4.7.3 se muestran los puntos de fluencia para las muestras compactadas estáticamente (ω =26% y 32%, e= 1.21 y 1.03, respectivamente) sometidas a carga isótropa en estado saturado (rombos con succión 0). También se ha incluido los puntos representativos del estado después de compactar considerando la tensión vertical de compactación y un valor de K_0=0.4 y la succión matricial se ha estimado con los valores de la tesis de Romero (1999). Se incluye también puntos de resultados obtenidos por Romero (1999) para un índice de poros 0.93.

Considerando que la forma de la superficie de fluencia no cambia de forma al cambiar el tipo de compactación pueden estimarse los valores de la tensión media debida a la compactación dinámica (0.12 MPa para la muestra CD 1,32) y (0,18 para la muestra CD 1,22). Utilizando el valor de K_0= 0.4 resulta un valor de la tensión vertical de compactación equivalente de 0.2 y 0.3 MPa respectivamente para la muestras CD 1,32 y CD 1,22. Estos valores resultan ser parecidos, aunque algo menores a los que se deducen de la Figura 4.7.2 considerando la curva con la energía de Proctor Normal en el molde del anillo edométrico (del orden de 0.4 MPa).

La Tabla 4.7.2 muestra un resumen de los parámetros considerados en el dibujo de la curva LC, así también presenta los resultados de ella obtenidos para las tensiones media correspondientes a la CD.

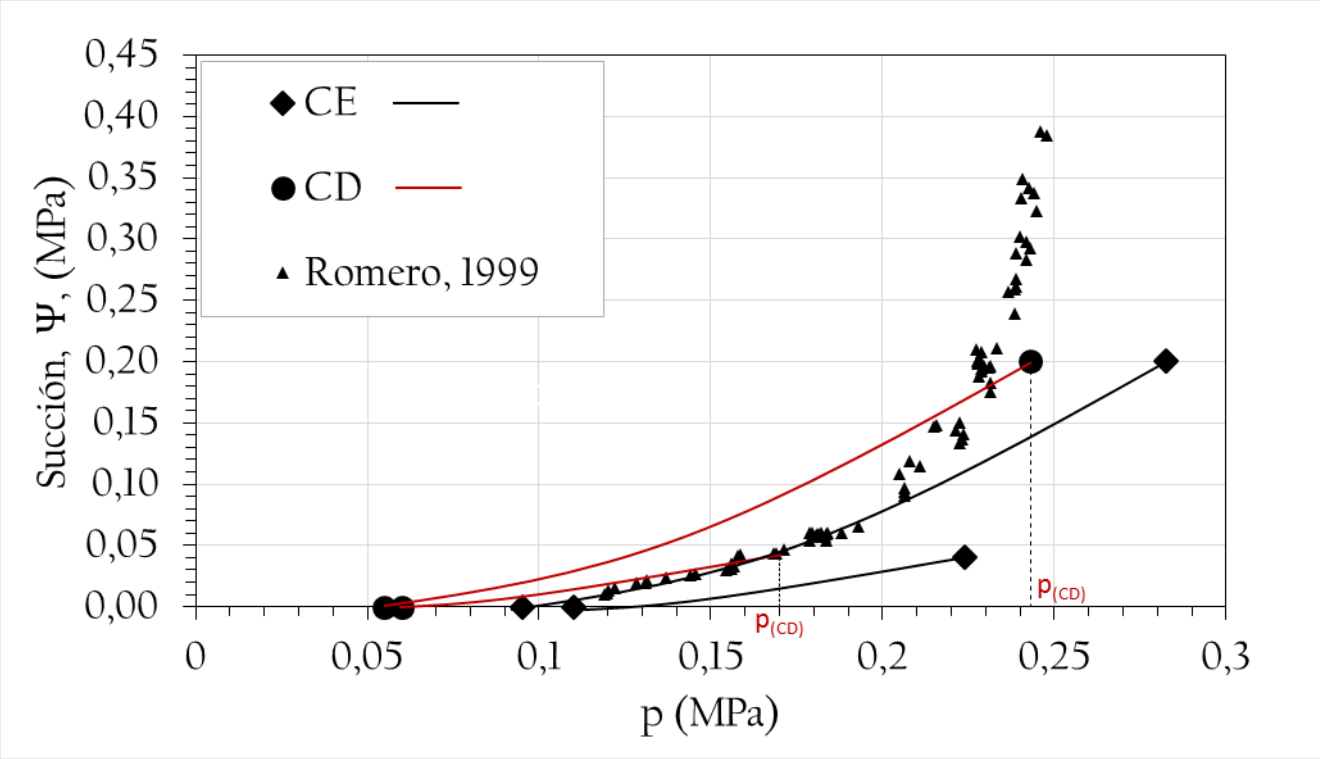


Figura 4.7.3. Superficie de fluencia en espacio de tensiones (p, s) de las compactaciones dinámicas y estáticas.

Tabla 4.7.2. Parámetros y resultados de las curvas LC.

K_0	0,4	
$\Psi_{(matricial)}$ (Mpa)	0,2	0,04
ω (%)	26	32
σ_{max}(Mpa)	0,471	0,373
e (estudio actual)	1,2	1,04
e (Romero, 1999)	0,93	
COMPACTACION ESTÁTICA		
p	Ψ (Mpa)	e
0,095	0	1,2
0,283	0,2	
0,11	0	1,04
0,224	0,04	
COMPACTACIÓN DINÁMICA		
p	Ψ (Mpa)	e
0,06	0	1,21
0,243	0,2	
0,055	0	1,05
0,17	0,04	

4.8. MICROESTRUCTURA

El estudio de la estructura interna de las muestras compactadas se realizó mediante porosimetría con intrusión de mercurio (MIP) utilizando el Porosímetro Autopore IV 9500 disponible en el laboratorio de geotecnia de la UPC (ver Figura 3.4.15). Las muestras fueron analizadas luego de compactadas (estática y dinámicamente) antes de ser sometidas a ensayos de consolidación, es decir, se estudió la estructura alcanzada por el suelo debido a la compactación. Para la determinación de la e_M y la e_m se consideró en índice de poros total de cada muestra ya conocido, es decir, $e = e_M + e_m$.

Las Figura 4.8.1 Figura 4.8.2 muestran los resultados de la porosimetría para las muestras compactadas dinámicamente con densidades secas y humedades diferentes. CD (1.22) con una humedad de 26% y CD (1.33) con una humedad de 31%. Las Figura 4.8.3 yFigura 4.8.4 muestran los mismos resultados pero esta vez para las muestras compactadas estáticamente con densidades secas y humedades diferentes. CE (1.22) con una humedad de 26.6% y CE (1.33) con una humedad de 31.7%.

De la Figura 4.8.5 a la Figura 4.8.8 se comparan los resultados obtenidos para las muestras con análogas densidades secas y humedades pero compactadas de forma diferente, es decir, las compactaciones estáticas y dinámicas. En las muestras de densidad seca de 1.22 gr/cm^3 y humedad cercana al 26%, los resultados son prácticamente iguales, la muestra CE presenta un diámetro de micro poros ligeramente menor a la CD, (ϕ_{micro} DE < ϕ_{micro} CD), y lo inverso sucede con los macroporos, (ϕ_{macro} DE > ϕ_{macro} CD), (ver Figura 4.8.6). En las muestras con densidad seca de 1.33 gr/cm^3 y humedades de 31 y 32%, %, la muestra CE presenta un diámetro de microporos levemente menor a la CD, (ϕ_{micro} DE < ϕ_{micro} CD), y al igual que los macroporos donde es más apreciables esta diferencia, (ϕ_{macro} DE < ϕ_{macro} CD), en la Figura 4.8.8. Se puede apreciar que la muestra compactada estáticamente presenta un mayor número de poros intermedio que la muestra compactada dinámicamente. Las muestras compactadas dinámicamente presentan una macro porosidad mayor a las compactadas estáticamente. Mucha de esta macroporosidad se genera a tamaños superiores a los detectados por el porosimétro, lo que afecta a la determinación de $e_{micro.}$

La Tabla 4.8.1. **Resumen** de los resultados de las pruebas MIP, muestra los valores obtenidos de los diámetros de micro y macro poros, así también las porosidades e_{micro} y e_{macro} conseguidas.

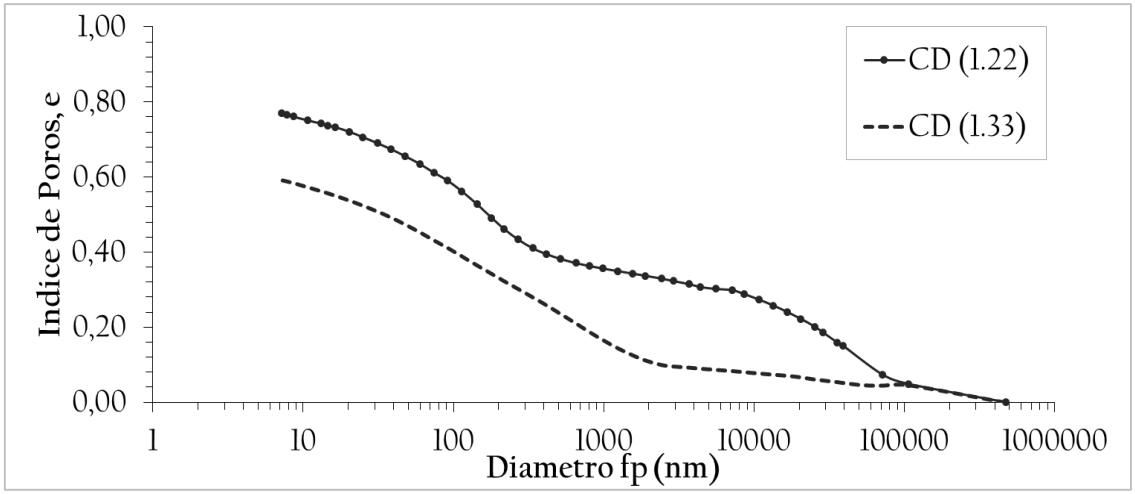


Figura 4.8.1. Porosidad por intrusión acumulad. Muestras compactadas dinámicamente.

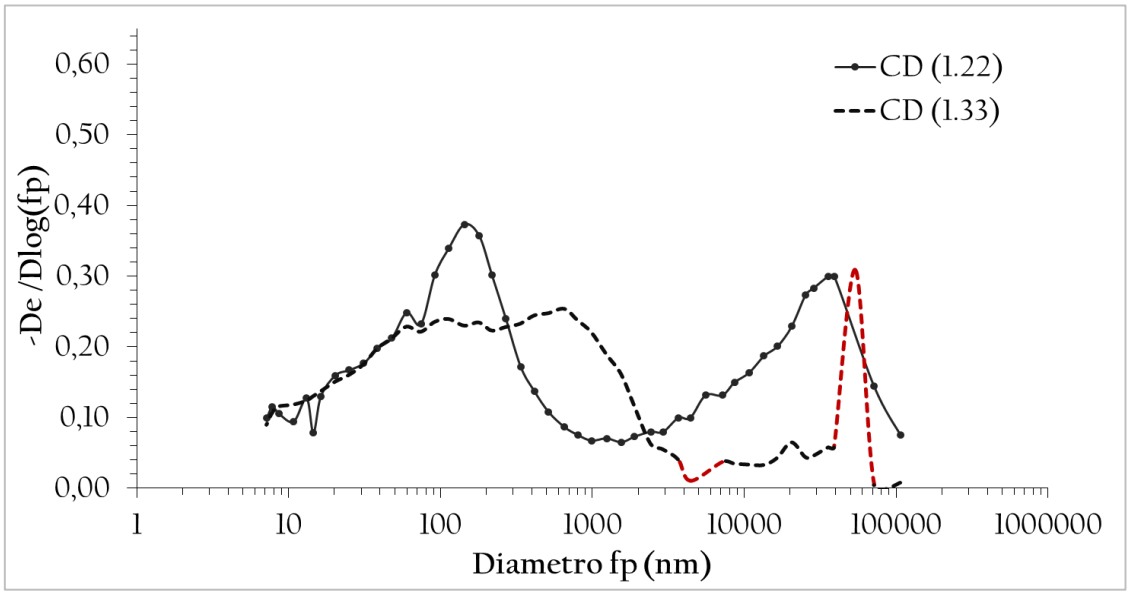


Figura 4.8.2. Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas dinámicamente.

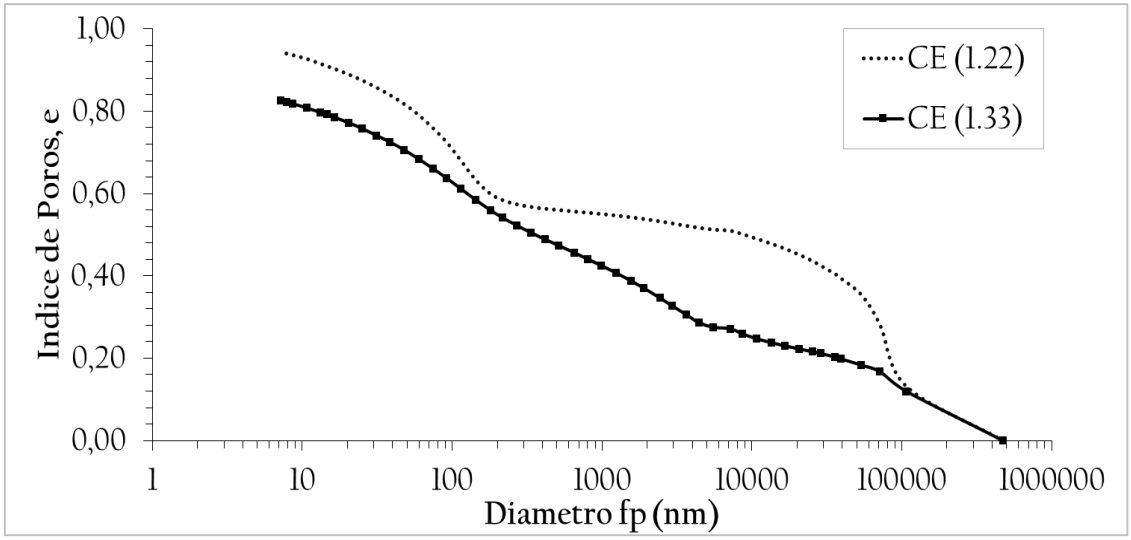


Figura 4.8.3. Porosidad por intrusión acumulada muestras compactadas estáticamente.

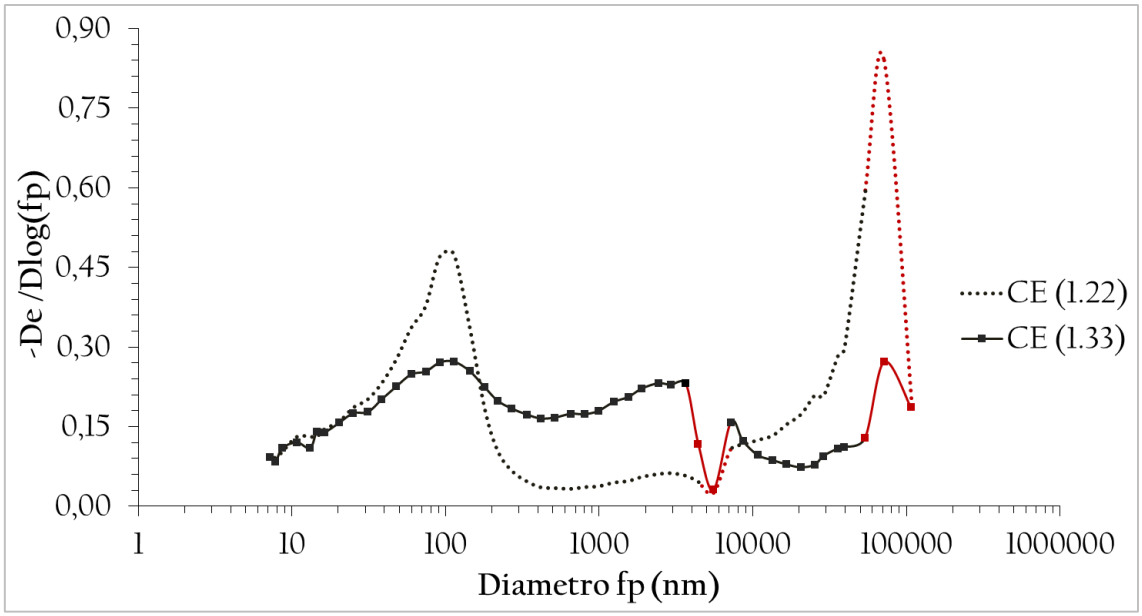


Figura 4.8.4. Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas estáticamente.

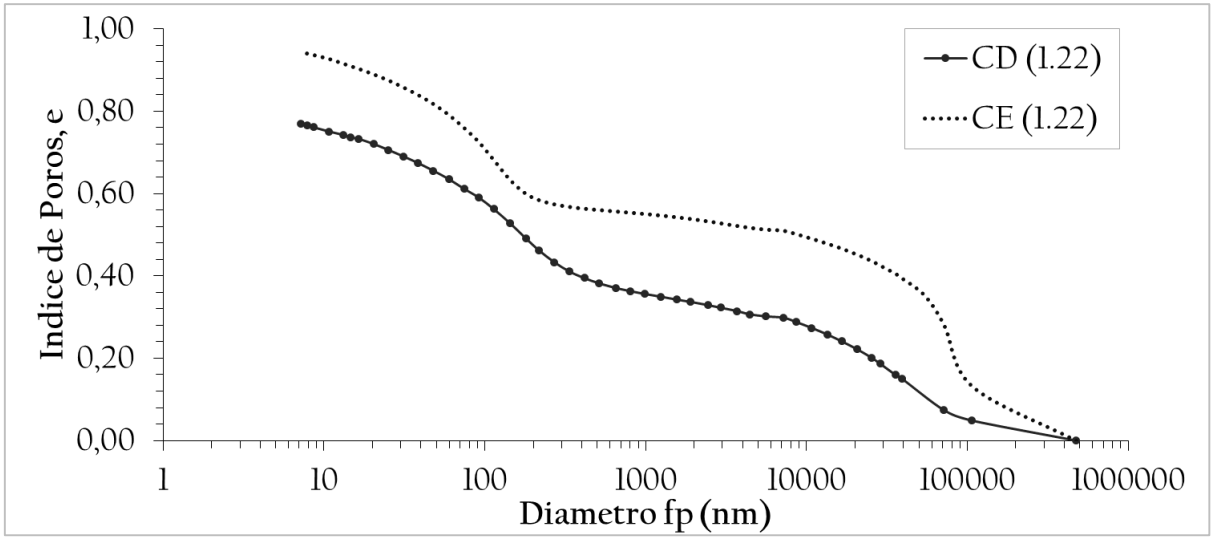


Figura 4.8.5. Porosidad por intrusión acumulada muestras de compactadas de forma dinámica y estática a la densidad seca de 1.22 gr/cm^3.

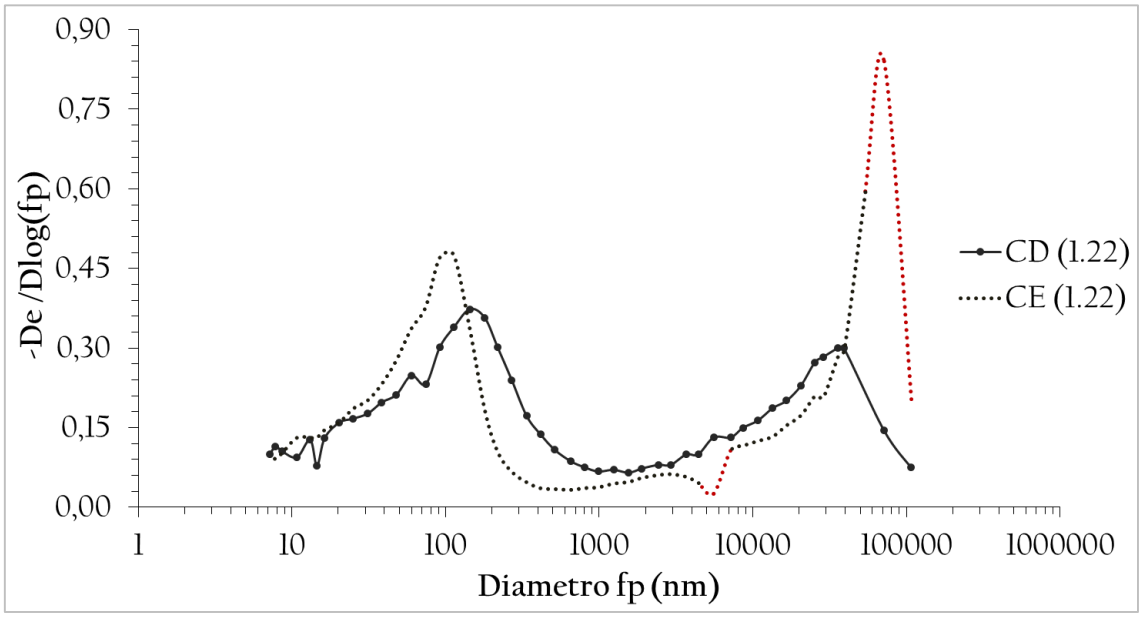


Figura 4.8.6. Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas estática y dinámica a densidad seca de 1.22 gr/cm^3.

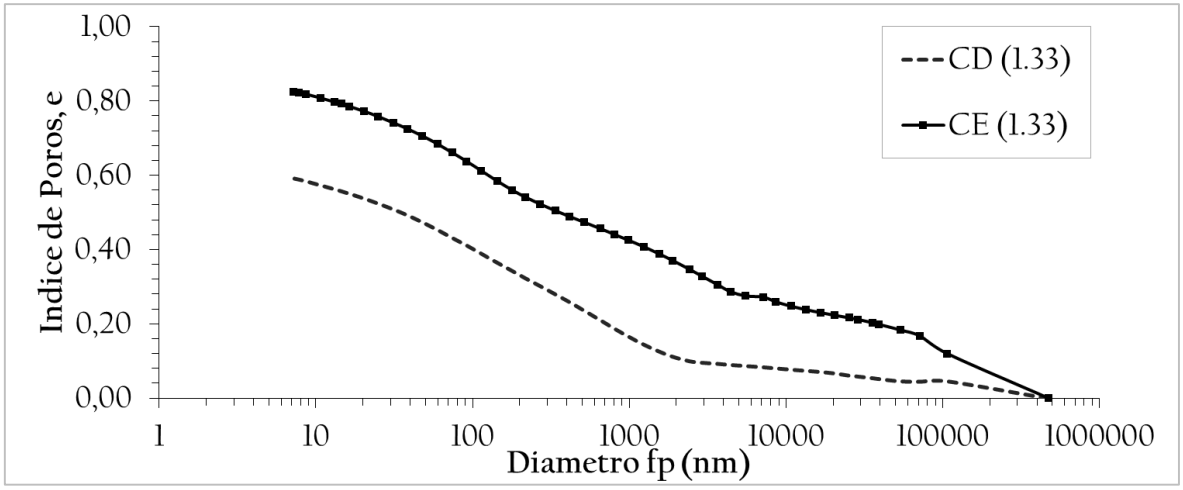


Figura 4.8.7Porosidad por intrusión acumulada muestras de compactadas de forma dinámica y estática de densidad seca 1.33 gr/cm^3.

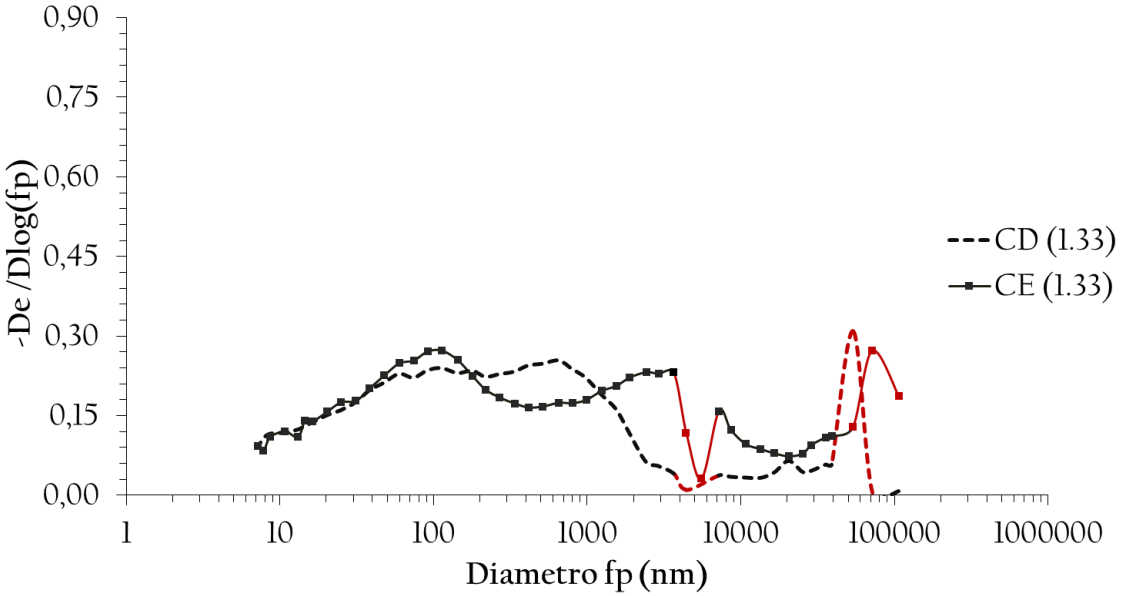


Figura 4.8.8. . Densidad de tamaños de poros en función de los resultados MIP. Muestras compactadas estática y dinámica a densidad seca de 1.33 gr/cm3.

Tabla 4.8.1. Resumen de los resultados de las pruebas MIP

Muestra	e_o	ω_o (%)	φp microestructura (nm)	φp macroestructura (nm)	e_{macro}	e_{micro}
CD (1,22)	1,21	26,0	150,0	3,90E+04	0,34	0,87
CD (1,33)	1,03	31,0	150,0	2,50E+04	0,08	0,95
CE (1,,22)	1,20	26,6	110,0	5,00E+04	0,56	0,65
CE (1,33)	1,04	31,7	120,0	3,50E+03	0,47	0,56

CAPÍTULO 5-CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

5.1. CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación se centra en el estudio comparativo de la arcilla Boom compactada dinámica y estáticamente. Se ha seguido un programa de ensayos de laboratorio basado en la realización de ensayos de consolidación isótropa utilizando el equipo triaxial, medidas de succión y porosimetrías de intrusión de mercurio (MIP) sobre las muestras compactadas.

En éste capítulo se presentan las conclusiones sobre la interpretación de los resultados experimentales del trabajo realizado en el laboratorio.

- El efecto de la fricción al momento de la compactación dinámica, ejerce un papel importante si la compactación se realiza en moldes de magnitudes pequeñas como es el caso del anillo edométrico.

- Al realizar varias compactaciones con el anillo edométrico, se evidencia que obtener muestras repetitivas compactadas dinámicamente con fines de estudios experimentales, resulta dificultoso debido a que existen situaciones y parámetros que no son totalmente controlados (aplicación de la energía de forma homogénea al suelo y enrasado adecuado del molde) que influyen en el valor final de la densidades secas obtenidas.

- En la compactación estática, se evidencia que a mayor humedad se necesita menor tensión vertical de compactación para un mismo volumen de la muestra.

- Al comparar las curvas de compresión (e-p) obtenidas del proceso de compactación estática y de consolidación saturada, esta última resulta ser menos deformables debido al proceso de densificación que sufre el suelo en el proceso de compactación. (Figura 4.2.8 Figura 4.2.9).

- Al realizar el ensayo de consolidación a las muestras compactadas estáticamente, se pudo ver que la presión de preconsolidación determinadas resultaron menores a las presiones máximas de compactación, esto debido a que en la consolidación el suelo está saturado y en la compactación no.

- El tipo de compactación no representa un parámetro influyente al momento de determinar la permeabilidad saturada o la medida de la succión total del suelo. Sin

embargo, se esperarían permeabilidades algo superiores en suelos compactados dinámicamente por la mayor macroporosidad inducida. se comprueba al contrastar los resultados de Romero (1999) con los del estudio actual, que a menor densidad, es decir, mayor índice de poros, la permeabilidad será mayor (Figura 4.4.1).

- La presión de poros existente al momento de aplicar la carga para consolidación puede influir de manera importante en las presiones efectivas obtenidas, y por ende, en la presión de preconsolidación. Sin embargo, los valores la presión de poros medida ha sido muy inferior a la presión de confinamiento aplicada (como mucho 100 kPa frente a 1690 kPa).

- La presión de preconsolidación será mayor a mayor densidad seca inicial.

- Las presiones de preconsolidación resultaron ser mayores en las muestras compactadas de forma estática, esto se observa por la diferencia entre los valores de energía y tensión vertical entre ambas compactaciones. Es decir, al compactar el suelo dinámicamente, la energía aplicada que equivaldría a la tensión vertical en la compactación estática, no es totalmente absorbida por el suelo, teniendo una presión equivalente ligeramente menor. La diferencia de energía se pierde en rotura de agregados y partículas de suelo y rozamiento con las paredes.

- El tipo de compactación no representa un parámetro determinante en relación a los cambios de volúmenes del suelo frente a la saturación. Si se evidencia que los suelos compactados a baja densidad seca y del lado seco, tienden al colapso, mientras que los suelos con mayor densidad seca tienden al hinchamiento y que suelos compactados a una humedad alta aunque su densidad seca sea baja no tienden a presentar cambios de volumen al ser saturados (Figura 4.6.1).

- Los valores de la tensión vertical que equivaldría a la energía de compactación del Proctor normal para las muestras estudiadas resultaron en torno a 0.40 MPa para la muestra de 32% de humedad y entre 0.78 y 1.0 MPa para la muestra de 26% de humedad. La energía aplicada en compactación estática para alcanzar las densidades de Proctor normal es inferior (0.1-0.2 MJ/m^3) a la que se aplica por golpes (0.6 MJ/m^3). Esto evidencia la pérdida de energía de la compactación dinámica.

- El valor del diámetro de la micro estructura es análogo para las muestras con igual compactación y similares entre las de ambas compactaciones. El valor del diámetro de la macroestructura obtenido en la compactación será mayor a menor densidad seca, independientemente del tipo de compactación.

5.2. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Una futura línea de investigación sería ensayar un mayor número de muestras con diferentes contenido de humedad y densidad seca, con el fin de aplicar, y contrastar los resultados obtenidos.

Realizar los ensayos de consolidación con menor velocidad para evitar el aumento significativo de la presión de poros.

En este estudio se realizó la medida de la succión total luego de compactada la muestra. Se propone la mediada de la curva de retención en secado, a ser posible midiendo la succión matricial de las muestras compactadas.

Se debería profundizar en el papel de la microestructura generada por la compactación en el comportamiento del suelo.

Sería interesante modelar numéricamente todo el proceso de compactación estática descarga, saturación y carga isótropa a fin de comparar los resultados de los modelos con las medidas realizadas en este trabajo.

Por último, sería interesante realizar los ensayos de compactación con un equipo que permitiera la medida de las tensiones laterales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Alonso, E.E., Gens, A., and Hight, D.W. (1987) Special problem soils. General report. In Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 3: 1087-1146.

Baldi, G., Hueckel, T. & Pellegrini, R. (1988). Thermal volume changes of mineral-water system in low porosity cllay soils. Can. Geotech. J., 25: 807-825.

Barrera Bucio, M. y Garnica Anguas, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. Secretaría de comunicaciones y transportes, Instituto mexicano del transporte.

Bonilla, A. (2013). Influencia de las condiciones de compactación en la presión de preconsolidación de un suelo. Trabajo final de carrera. Universitat Politécnica de Catalunya.

Deng Y.F., Tang A. M., Cui Y.J., Li. X.L. (2011). Study on the hydraulic conductivity of Boom clay. Canadian Geotechnical Journal, 48: 1461-1470

Delage, P. & Lefebvre, G. (1984). Study of the structure of a sensitive Chaplain clay and its evolution during consolidation. Can. Geotech. J., 21:21-35.

Gómez, E. (2013). Efectos de las condiciones iniciales de compactación dinámica en la presión de preconsolidación de un suelo. Tesis de máster. Universidad Politécnica de Catalunya.

Gómez, R. (2009). Caracterización hidromecánica del suelo del terraplén experimental de Rouen. Tesis de máster. Universitat Politécnica de Catalunya.

González, B. L. (2012). La microestructura en el comportamiento volumétrico de un suelo compactado. Tesis de máster. Universidad Politécnica de Catalunya.

Grupo de Geotecnia de la Universidad de Cantabria (2013).Suelos Parcialmente Saturados. Capítulo 5 de Materiales de Clase de Geotecnia I. Santander.

Hoserman, S. T., Winter, M. G. & Entwistle, D. C. (1987). Geotechnical characterization of Boom clay in relation to the disposal of radioactive waste. Publications of the European Communities, EUR 10987 EN, Luxemburgo.

Ismael, E. (2013). Efecto de la microestructura en la permeabilidad, la compresibilidad ante carga y el módulo de corte de un limo arcilloso compactado. Tesis de máster. Universitat Politécnica de Catalunya.

Lagny, C. (1996). Comportement mécanique des sols fins sous fortes pressions négatives. PhD Thespis, Ecole Centrale Paris.

Lawton, E.C., R.J. Fragaszy & J.H. Hardcastle (1989) Collapse of compacted clayey sand. Jnl. Geotech. Engng. ASCE. 115, 9: 1252-1267.

Páramo, J.A. (2002). Compactación de Suelos y Materiales Estabilizados. Material de Apoyo en la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Rhattas, A. (1994). Transfert de masse dans les matériaux argileux a faible porosité. Analyse théorique et résultats expérimentaux. PhD. Thesis, Université D'Orleans.

Romero, E. (1999). Thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated Boom clay: an experimental study. PhD Thesis, Technical University of Catalunya, Spain.

Schokking, F. & Nooy van der Kolff, A. H (1995). History and geotechnial properties of the marine Boom clay. Proc. 11th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Copenhagen, 7: 141-148.

Tomás, R., Cuenca, A., Delgado, J., Doménech C., Mirad, A. (2010). Cálculo analítico de la presión de preconsolidación del suelo: Aplicación a la vega baja del Río Segura (Alicante).

UNE 103-500-94 (1994). Norma Española. Geotecnia Ensayo de compactación. Proctor Normal.

Universidad Politécnica de Catalunya, UPC (2013). Tema 10. Introducción a los suelos no saturados. Apuntes de la asignatura de Geotecnia en el Grado de Ingeniería de la Construcción. Barcelona.

Universidad Politécnica de Catalunya, UPC (2013). Tema 2. Estructura y propiedades básicas de los suelo. Identificación y clasificación. Apuntes de la asignatura de Geotecnia en el Grado de Ingeniería de la Construcción. Barcelona.

Wan, A.W.L. (1996). The use of thermocouple psychrometers to measure in situ suction and water contents in compacted clays. PhD Thesis, University of Manitoba.