PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DETERMINACIÓN DE CORRELACIONES ENTRE ÍNDICES DEL DILATÓMETRO DE MARCHETTI OBTENIDOS IN SITU Y PARÁMETROS GEOMECÁNICOS Y FÍSICOS, TALES COMO; EL CORTE NO DRENADO, MÓDULO DE ELASTICIDAD Y DENSIDAD, OBTENIDOS POR ENSAYOS DE LABORATORIO PARA SUELOS BLANDOS EN EL SECTOR DEL GARROCHAL AL SUR DE QUITO.

AUTOR:
MAYANQUER ROSERO JORGE ISRAEL

DIRECTOR:
ING. ALBUJA SÁNCHEZ JORGE DAVID

Quito, octubre del 2022

AUTORÍA

Yo, Jorge Israel Mayanquer, titular la cedula de identidad No. 1719237800, juro que esta investigación es de exclusiva responsabilidad del autor y que las diversas fuentes de información son respetadas por las respectivas citas. Esta investigación es el resultado de un cuidadoso trabajo realizado íntegramente por mí.

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mis padres por su amor incondicional. Además de haber acompañado y financiado mi carrera universitaria.

A mis abuelos que han compartido su tiempo conmigo al ayudarme en cada proceso, no solo de mi carrera sino de mi vida estudiantil y personal en general.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los ingenieros Paul Molina y Mariela Anaguano por su ayuda en la ejecución de ciertas actividades necesarias para esta disertación y su apoyo fuera de la vida estudiantil.

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio en suelos orgánicos en el sector “El Garrochal” al sur de Quito, Ecuador. Consiste en la obtención de correlaciones que permitan obtener parámetros de corte no drenado, módulo de deformación restringido y densidad utilizando los índices del ensayo del dilatómetro (DMT) en suelos orgánicos con características similares a los hallados en el depósito de estudio. En el sitio de investigación se obtuvo muestras las cuales fueron clasificadas además de ser sometidas a ensayo triaxial y de relaciones fundamentales con el fin de hallar los parámetros de interés. De igual manera se ejecutó varios ensayos DMT en el mismo lugar para obtener los índices a correlacionar. Los datos una vez recopilados, y con la ayuda de softwares estadísticos, fueron correlacionados para obtener 3 expresiones. Los resultados obtenidos con dichas expresiones fueron comparados con los resultados obtenidos con las expresiones propuestas por Marchetti, de esta manera se pudo concluir si estas difieren o complementan este estudio.

Palabras claves: DMT, corte no drenado, densidad, módulo restringido de deformación, suelos orgánicos.

ABSTRACT

This paper presents a study on organic soils in the sector "El Garrochal" south of Quito, Ecuador. It consists of obtaining correlations that allow obtaining undrained shear strength parameters, constrained deformation modulus and density using the dilatometer test (DMT) indices in organic soils with similar characteristics to those found in the study deposit. At the research site, samples were obtained, which were classified in addition to being subjected to triaxial testing and fundamental relationships to find the parameters of interest. In the same way, several DMT tests were carried out in the same place to obtain the indices to be correlated. The data once collected, and with the help of statistical software, were correlated to obtain 3 expressions. The results obtained with these expressions were compared with the results obtained with the expressions proposed by Marchetti, in this way it was possible to conclude if they differ or complement this study.

Keywords: DMT, undrained shear strength, density, constrained deformation modulus, organic soils.

ÍNDICE

AUTORÍA 2

DEDICATORIA 3

AGRADECIMIENTO 4

RESUMEN 5

ABSTRACT 6

ÍNDICE 7

CAPÍTULO I 13

1. INTRODUCCIÓN 13

1.1. Justificación 13

1.2. Alcance 13

1.3. Antecedentes 14

1.4. Planteamiento del problema 16

1.5. Objetivos 17

CAPÍTULO II 19

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y ENSAYOS DE CAMPO 19

2.1.1. Ubicación del proyecto y metodología de investigación 19

2.1.2. Perforaciones de muestreo 21

2.1.3. Dilatómetro de Marchetti 24

CAPÍTULO III 34

3. ENSAYOS DE LABORATORIO 34
3.1.1. Clasificación de suelos (USCS) 34
3.1.2. Contenido de humedad 34
3.1.3. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad 35
3.1.4. Granulometría 38
3.1.5. Contenido orgánico 40
3.1.6. Resumen de resultados. 43
3.1.7. Obtención de densidad 47
3.1.8. Gravedad específica 49
3.1.9. Ensayo triaxial 50
3.1.10. Resultados 52
3.1.11. Corte no drenado 53
3.1.12. Módulo de deformación restringido 55
CAPÍTULO IV 59
4. CORRELACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 59
4.1.1. Módulo de deformación restringido 59
4.1.2. Corte no drenado 62
4.1.3. Densidad 66
CAPÍTULO V 69
5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 69
5.1.1. Discusión y conclusiones 69

5.1.2. Recomendaciones 71

6. BIBLIOGRAFÍA 72

7. ANEXOS 75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de muestreo pozo 1. 22
Tabla 2: Resumen de muestreo pozo 2. 22
Tabla 3: Resumen de muestreo pozo 3. 22
Tabla 4: Resumen de muestreo pozo 4. 23
Tabla 5: Resumen parámetros clasificación pozo 1. 43
Tabla 6: Resumen parámetros clasificación pozo 2. 44
Tabla 7: Resumen parámetros clasificación pozo 3. 45
Tabla 8: Resumen parámetros clasificación pozo 4. 46
Tabla 9: Valor de B en cada una de las probetas previas a ser sometidas a compresión. 52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de suelo en el sector de Turubamba (Municipio de Quito, 2016). 15
Figura 2: Zonas afectadas y nivel de amenaza debido al fenómeno de subsidencia en el sector de Turubamba (Municipio de Quito, 2016). 16
Figura 3: Zonas afectadas y nivel de amenaza por asentamiento en el sector de Turubamba (Municipio de Quito, 2016). 16
Figura 4: Ubicación del sector de estudio dentro de la ciudad de Quito 19
Figura 5: Torre de perforación Longyear (der) y plataforma del DMT (izq) asentadas en el sector de estudio. 20
Figura 6: Material no apto para su uso obtenido por barril con inyección de agua. 21
Figura 7: Cuerpo de madera encontrado en un tubo shelby en el pozo 2. 23
Figura 8: Posición adecuada para calibrar la paleta del DMT (TC16 DMT Report, 2001). ... 25
Figura 9: Clasificación del suelo de acuerdo a su Id. (TC16 DMT Report, 2001) 25
Figura 10: Formulario resumen de correlaciones provistas por Marchetti (TC16 DMT Report, 2001). 27

Figura 11: Nomograma que provee el valor de γ_s/γ_w para la obtención de densidad de un suelo (TC16 DMT Report, 2001). 28
Figura 12: Id con relación a su profundidad pozo 1. 29
Figura 13: Kd con relación a su profundidad pozo 1. 29
Figura 14: Ed con relación a su profundidad pozo 1. 29
Figura 15: Id con relación a su profundidad pozo 2. 30
Figura 16: Kd con relación a su profundidad pozo 2. 30
Figura 17: Ed con relación a su profundidad pozo 2. 30
Figura 18: Id con relación a su profundidad pozo 3. 31
Figura 19: Kd con relación a su profundidad pozo 3. 31
Figura 20: Ed con relación a su profundidad pozo 3. 31
Figura 21: Id con relación a su profundidad pozo 4. 32
Figura 22: Kd con relación a su profundidad pozo 4. 32
Figura 23: : Ed con relación a su profundidad pozo 4. 32
Figura 24: Contenido de humedad con relación a la profundidad. 35
Figura 25: Ensayo para hallar el límite liquido (izq) y ensayo para hallar límite plástico (der). 36
Figura 26: Material seco el cual perdió plasticidad para realizar el ensayo unipunto. 37
Figura 27: Carta de plasticidad (ASTM D2487, 2022) 37
Figura 28: Límite líquido con relación a la profundidad. 38
Figura 29: Índice de plasticidad con relación a la profundidad. 38
Figura 30: Material siendo sometido a granulometría por lavado. 39
Figura 31: Materia orgánica retenida sobre el tamiz 200 (izq) y arena retenida sobre el tamiz 200 (der). 40
Figura 32: Granulometría conjunta de los cuatro pozos. 40
Figura 33: Material sometido al ensayo de incineración. 41
Figura 34: Contenido de ceniza con relación a la profundidad. 41
Figura 35: Porcentaje de contenido orgánico con relación a la profundidad. 42
Figura 36: Clasificación del suelo según su contenido de cenizas (ASTM D4427, 2022). 42
Figura 37: Densidad con relación a la profundidad. 48
Figura 38: Densidad promedio de los 4 pozos junto con su desviación estándar en relación a la profundidad. 48
Figura 39: Relación entre la gravedad especifica del suelo y su contenido de ceniza (Skempton & Petley, 1970) 49

Figura 40: Relación entre la gravedad específica y el contenido de ceniza. (Li, y otros, 2020) 50
Figura 41: Comportamiento de suelos saturados al ser sometidos a triaxiales UU (Head & Epps, 2014). 51
Figura 42: Ecuación deducida para el cálculo de B (Head & Epps, 2014).....52
Figura 43: Corte no drenado con relación a la profundidad. 53
Figura 44: Corte no drenado promedio de los 4 pozos con su desviación estándar en relación a la profundidad. 54
Figura 45: Diferentes materiales hallados en un mismo tubo shelby que presentan diferentes consistencias. 55
Figura 46: Curvas esfuerzo deformación para diferentes materiales (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2010).....56
Figura 47: Módulo de deformación restringido con relación a la profundidad. 56
Figura 48: Módulo de deformación restringido promedio de los 4 pozos con su desviación estándar en relación a la profundidad. 57
Figura 49: Clasificación de la consistencia de suelos de acuerdo con su módulo de deformación restringido (Akpila & Omunguye, 2014).....57
Figura 50: Fórmulas para encontrar el módulo edométrico (ASTM D6635-15, 2015).....59
Figura 51: Relación entre el módulo de deformación restringido en campo y el valor de Ed. 60
Figura 52: Relación entre el Id y el Kd. 60
Figura 53: Correlación y ecuación de regresión para obtención del módulo de deformación restringido. 61
Figura 54: Comparación entre diferentes valores de módulo de deformación restringido. 61
Figura 55: Módulo de deformación restringido correlación. 62
Figura 56: Ecuación propuesta por Marchetti para encontrar el corte no drenado. 62
Figura 57: Distribución de el corte no drenado, Kd y el esfuerzo efectivo vertical con relación a la profundidad. 63
Figura 58: Relación entre variables (Cu, Kd y σ'_v) 64
Figura 59: Ecuación de corte no drenado hallado por medio de la correlación de datos propios (metro 2 - 10) 64
Figura 60: Comparación entre diferentes valores de corte no drenado. 65
Figura 61: Ecuación de corte no drenado hallado mediante la correlación de datos propios (todo el pozo). 65
Figura 62: Comparación entre corte no drenado hallado por medio de la ecuación Marchetti y

el corte no drenado hallado por medio de la ecuación en la figura 61.....66
Figura 63: Correlación y regresión entre la densidad y el valor Id.....67
Figura 64: Ecuación de densidad hallada mediante la correlación de datos propios.....67
Figura 65: Comparación entre densidad hallada por medio de nomograma de Marchetti, la densidad hallada por medio de la ecuación en la figura 62 y la densidad hallada en laboratorio.....68

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

En toda construcción, el suelo es uno de los materiales más importantes al momento de realizar un diseño estructural-geotécnico. El suelo, por medio de la cimentación, será el responsable de recibir y soportar las cargas provenientes de cualquier estructura, por lo tanto, si el sistema llegase a fallar, ya sea por capacidad o desempeño, se comprometería la integridad de la estructura y, de ser el caso, pérdida de vidas humanas. Un estudio geotécnico debe proveer parámetros geomecánicos confiables para el análisis, tanto por capacidad como por desempeño. Muchas veces no se posee recursos económicos necesarios para realizar la variedad de ensayos requeridos para obtener dichos parámetros, por lo tanto, se opta por estimarlos mediante correlaciones con información de otros ensayos que son más accesibles, rápidos y sencillos de hacer. Uno de ellos es el Dilatómetro de Marchetti, el cual corresponde a un ensayo *in situ*; su creador, Silvano Marchetti, proveyó a la comunidad el método de ensayo y propuso parámetros específicos según fundamento teórico del procedimiento a partir de los cuales se han generado correlaciones para estimar parámetros del suelo de manera certera.

La confiabilidad en los tipos de depósitos investigados, que no pueden ser extrapolados a otros depósitos, se puede complementar con ecuaciones aplicables a nuestro medio que, en este caso, corresponde a suelos blandos principalmente orgánicos.

1.2. Alcance

El proyecto comprende la obtención de correlaciones que permitan determinar parámetros geomecánicos de corte no drenado, módulo de deformación restringido y densidad, en suelos blandos saturados del sector “El Garrochal” en Quito-Ecuador, por medio de la comparación estadística entre los indicadores obtenidos del ensayo de Machetti (E_d, I_d y K_d) y parámetros geomecánicos derivados de ensayos de laboratorio. Cabe destacar que el producto final de este trabajo busca complementar y acompañar a las correlaciones que ya se

utilizan hoy en día y fueron derivadas por Marchetti. Dado que el material hallado en el sector de análisis es blando orgánico, estos requieren un estudio independiente, por lo tanto, las correlaciones obtenidas pueden variar con las correlaciones de Marchetti.

1.3. Antecedentes

Dada la importancia del estudio de suelos en proyectos de ingeniería, podemos suponer las consecuencias desfavorables o críticas que resultan de no realizarlos. Tomando en cuenta que los suelos blandos, por su composición, acarrean problemas si no son tratados de manera correcta, obviar un estudio y análisis de parámetros conllevaría a sufrir uno o varios de estos problemas: subsidencia, baja capacidad de soporte o deformaciones (efectos a largo plazo, problemas de consolidación secundaria, agravados por extracción de agua o excavaciones profundas) (Municipio de Quito, 2016). El sector analizado, "El Garrochal", posee suelo blando orgánico, de acuerdo con los estudios y observaciones realizados para este trabajo.

Un ejemplo del estudio geotécnico parcial o nulo es el presentado en el informe por el Municipio de Quito acerca del "DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE AMENAZAS, VULNERABILIDADES Y RIESGOS" del sector "Turubamba" en el año 2016. De acuerdo con el trabajo en cuestión, el sector posee suelos blandos orgánicos, igual que los encontrados en el sector de análisis, por lo tanto, podemos aprender de lo sucedido en dicho sector para evitar daños en futuros proyectos en otros sectores con características similares en su suelo.

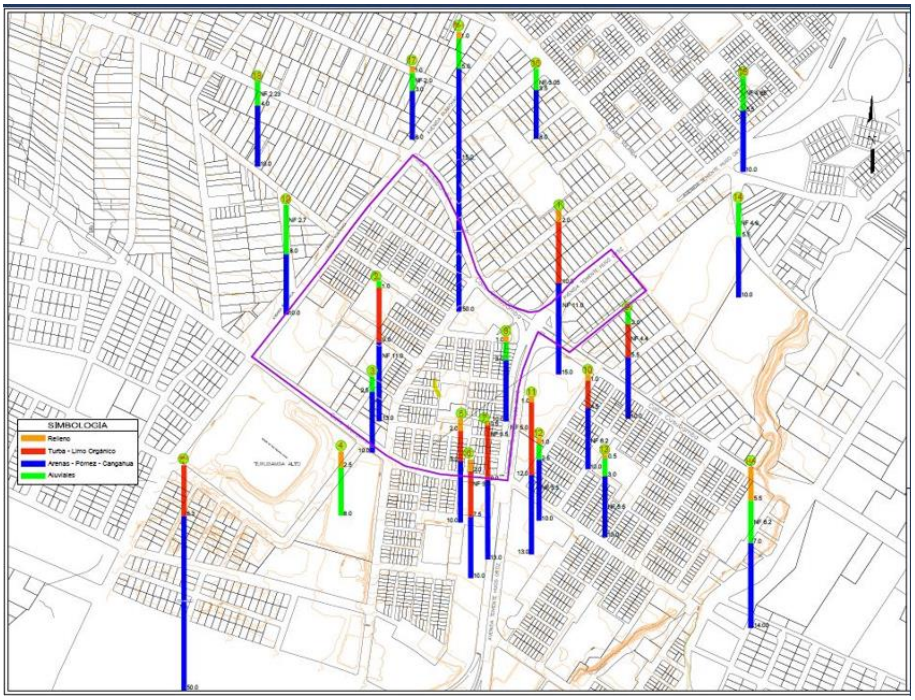


Figura 1: Clasificación de suelo en el sector de Turubamba (Municipio de Quito, 2016).

El documento antes mencionado presenta las consecuencias a las cuales estuvo expuesto el sector "Turubamba" al no usar el protocolo adecuado al momento de diseñar y construir. En la figura 2 se puede observar las estructuras afectadas por el fenómeno de subsidencia (hundimiento) y el nivel de riesgo que estas presentan. Otro problema muy común en suelos blandos es el asentamiento, de igual manera la figura 3 presenta el grado de afectación que tiene este sector en cuanto a este efecto. Estos problemas pudieron ser evitados con el adecuado diseño tomando en cuenta la situación natural del suelo.

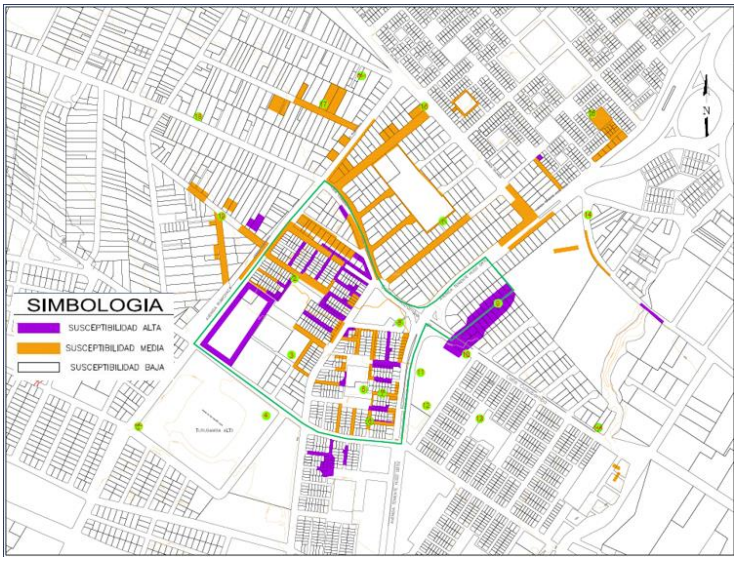


Figura 2: Zonas afectadas y nivel de amenaza debido al fenómeno de subsidencia en el sector de Turubamba (Municipio de Quito, 2016).

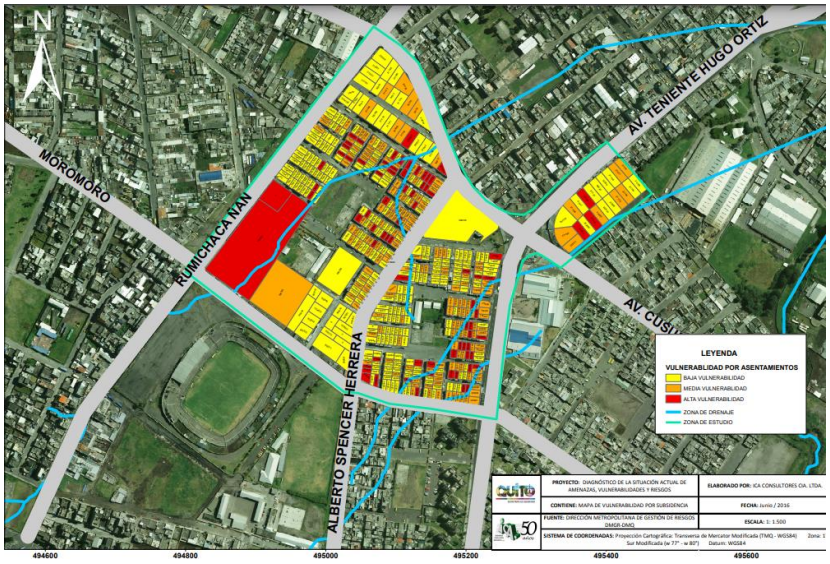


Figura 3: Zonas afectadas y nivel de amenaza por asentamiento en el sector de Turubamba (Municipio de Quito, 2016).

Con los ejemplos planteados es necesario hacer énfasis en la importancia del estudio geotécnico, sobre todo suelos blandos. Las correlaciones que concluyen con esta disertación proveerán información sobre los parámetros mecánicos de suelos blandos orgánicos similares.

1.4. Planteamiento del problema

De acuerdo con (TC16 DMT Report, 2001), Silvano Marchetti publicó una serie de correlaciones, las cuales refieren a la obtención de parámetros del suelo, basándose en

ensayos realizados en localidades italianas. En un estudio realizado por el Ingeniero Jorge Albuja, este corroboró que, en condiciones no drenadas y no consolidadas, el ensayo DMT provee resultados con una tendencia similar, pero no idéntica, a los obtenidos por Marchetti en su época, pero en suelos blandos orgánicos ecuatorianos (Albuja J. D., 2016). Si bien Marchetti generó correlaciones que permiten encontrar parámetros geomecánicos confiables utilizando resultados del Dilatómetro, y que estos han sido validados en Ecuador, convendría obtener expresiones para aumentar el nivel de precisión de los parámetros a obtener, sobre todo en suelos orgánicos que, por su composición, requieren especial cuidado al momento de diseñar.

1.5. Objetivos

Objetivo General

- Generar correlaciones entre los indicadores del suelo obtenidos por medio del ensayo con el dilatómetro in situ y parámetros de resistencia al corte y deformabilidad obtenidos mediante ensayos en muestras pequeñas en laboratorio tales como el corte no drenado, módulo de deformación restringido y así como con propiedades físicas como la densidad, y complementar a las ecuaciones de Marchetti, las cuales ya han sido publicadas y validadas.

Objetivos Específicos

- Hacer uso del Dilatómetro de Marchetti sobre suelos que predominan en el sector de "El Garrochal" locales, posteriormente analizar los resultados obtenidos en campo.
- Ejecutar una variedad de ensayos normalizados en laboratorio, en base al tipo de suelo identificado en investigaciones previas, sobre muestras inalteradas que nos permitirán obtener los parámetros a correlacionar como también información del suelo, como la clasificación del material correspondiente.
- Usar estadística para hallar una tendencia y obtener, por correlación, expresiones para los parámetros de resistencia al corte no drenado, módulo de deformación restringido y densidad, para su posterior comparación con las investigaciones tanto de Marchetti

como de otros autores. La investigación únicamente contempla condiciones del suelo en esfuerzos totales no consolidados, no drenados con cien por ciento de saturación.

CAPÍTULO II

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y ENSAYOS DE CAMPO

2.1.1. Ubicación del proyecto y metodología de investigación

La ubicación del proyecto, del cual se va a recopilar los datos para esta disertación, se sitúa al sur del Distrito Metropolitano de Quito en el sector “El Garrochal”. Como se observa en la figura 4, se trata de un terreno cercado por el conjunto Terranova 4 y Terranova 7; se usarán estos conjuntos de referencia puesto que las calles no poseen un nombre ni numeración.

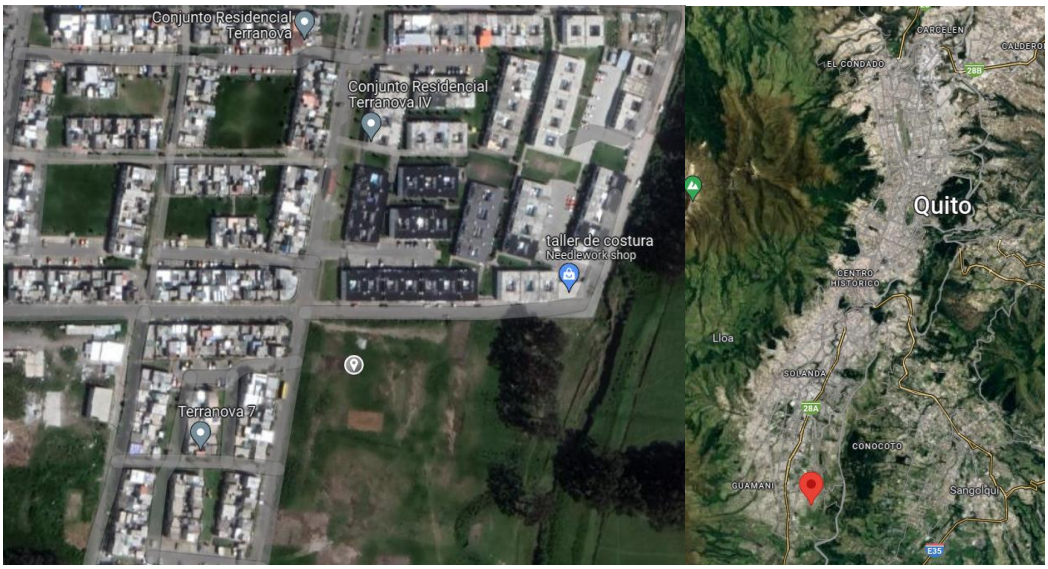


Figura 4: Ubicación del sector de estudio dentro de la ciudad de Quito

En cuanto a la metodología, se realizaron 4 pozos de 10 metros para obtener muestras inalteradas, las cuales posteriormente fueron sometidas a ensayos de laboratorio. La extracción se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D1587, Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Fine-Grained Soils for Geotechnical Purposes, y se utilizó una plataforma de perforación Long Year la cual permitió culminar con las perforaciones a la profunidad requerida. De igual manera se ejecutó 4 pozos del ensayo DMT de 10 metros cada uno en la misma localización que los pozos de muestreo, la norma que parametriza este ensayo es la ASTM D6635. Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer. Dilatómetro de Matchetti.



Figura 5: Torre de perforación Longyear (der) y plataforma del DMT (izq) asentadas en el sector de estudio.

Una vez que se obtuvo las muestras en laboratorio se ejecutó la correspondiente clasificación de suelos (USCS), la cual requiere encontrar los siguientes parámetros: contenido de humedad, granulometría, límite líquido y límite plástico. Además por la naturaleza del suelo hallado, se realizó el ensayo establecido en la norma ASTM D1997. Standard Test Method for Laboratory Determination of the Fiber Content of Peat and Organic Soils by Dry Mass, la cual provee las indicaciones para encontrar el contenido orgánico de un suelo mediante la incineración de la misma y así confirmar si es una turba (Pt) o material orgánico.

En cuanto a los ensayos mecánicos se ejecutaron triaxiales no drenado no consolidados (ASTM D2850) en aquellas muestras que hayan sido aptas para tallar, esto para la obtención del corte no drenado y el módulo de deformación restringido. Para hallar la densidad de las muestras se utilizó lo establecido con la norma ASTM D7263.

Cuando todos los datos se encontrarón tabulados, se procedió a hallar las correlaciones requeridas, esto haciendo uso de Excel y Minitab, de esta manera las 3 expresiones fueron obtenidas. Posteriormente sus resultados fueron comparados con los obtenidos mediantes las correlaciones de Marchetti, esto permitió concluir si difieren entre si.

2.1.2. Perforaciones de muestreo

Los pozos se encuentran ubicados en las coordenadas 0°20’24” S 78°31’59” O (figura 4) a una elevación de 2990 m.s.n.m., el espacio entre pozos es de 1.5 m y gracias al estado del material podemos definir el nivel freático a 1.5 metros desde la superficie. Se utilizaron tubos tipo Shelby para extracción de muestras; en un inicio se planteó extraer las muestras por barril, sin embargo, al inyectar agua para su expulsión estas se deshacían.



Figura 6: Material no apto para su uso obtenido por barril con inyección de agua.

Cabe resaltar que se tenía planificado extraer 80 muestras para su correspondiente análisis. Esta planificación se sustentaba por medio del Proyecto de Microzonificación del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) que lastimosamente fue suspendido debido a la pandemia por COVID 19. Por esta razón se tuvo que reducir el número de muestras dado que no se poseía los recursos económicos para extraer y analizar la cantidad planteada en un inicio. Se optó por sacar un tubo Shelby de 50 cm por metro de pozo, lo que daría un total de 40 muestras a analizar. Sin embargo, no se pudo recuperar muestra en todos los metros de perforación debido a la naturaleza del material, el tubo no era capaz de retener el mismo por su composición semilíquida. En ciertos tubos de muestreo unicamente se encontró cuerpos de madera o raíces. En las siguientes tablas se indican en que secciones se encontró material y la cantidad recuperada.

P01

Profundidad (m)	Recuperación de muestra	Penetración (cm)	Cantidad recuperada (cm)
0-1	Si	50	30
1-2	No	50	-
2-3	No	50	-
3-4	Si	50	50
4-5	Si	50	50
5-6	Si	50	50
6-7	Si	50	50
7-8	Si	50	50
8-9	Si	50	40
9-10	Si	50	50

Tabla 1: Resumen de muestreo pozo 1.

P02

Profundidad (m)	Recuperación de muestra	Penetración (cm)	Cantidad recuperada (cm)
0-1	Si	50	25
1-2	Si	50	40
2-3	Si	50	40
3-4	Si	50	40
4-5	Si	50	50
5-6	Si	50	50
6-7	No	50	-
7-8	Si	50	30
8-9	No	50	-
9-10	Si	50	30

Tabla 2: Resumen de muestreo pozo 2.

P03

Profundidad (m)	Recuperación de muestra	Penetración (cm)	Cantidad recuperada (cm)
0-1	Si	50	35
1-2	Si	50	50
2-3	Si	50	45
3-4	Si	50	30
4-5	Si	50	30
5-6	Si	50	50
6-7	Si	50	50
7-8	Si	50	50
8-9	Si	50	50
9-10	Si	50	50

Tabla 3: Resumen de muestreo pozo 3.

P04

Profundidad (m)	Recuperación de muestra	Penetración (cm)	Cantidad recuperada (cm)
0-1	Si	50	35
1-2	Si	50	25
2-3	Si	50	30
3-4	Si	50	50
4-5	Si	50	50
5-6	Si	50	50
6-7	Si	50	50
7-8	Si	50	45
8-9	Si	50	25
9-10	Si	50	45

Tabla 4: Resumen de muestreo pozo 4.

Se puede observar que existen secciones en las cuales se pudo recuperar poca cantidad de suelo y en otras su recuperacion era nula. Debido a esto se redujo el número de ensayos realizados en las muestras por Shelby dependiendo la cantidad que se encuentre en dicho tubo, priorizando la clasificación del suelo y el ensayo de densidad; esto quiere decir que existen secciones en las cuales se redujo el número de probetas en los ensayos triaxiales.



Figura 7: Cuerpo de madera encontrado en un tubo shelby en el pozo 2.

2.1.3. Dilatómetro de Marchetti

2.1.4. Conceptualización

El ensayo con el dilatómetro plano ejecutado *in situ* fue propuesto por Silvano Marchetti en 1980 . Consiste en la inserción, por intervalos, de una hoja de acero inoxidable, la cual posee en uno de sus costados una membrana. Por medio de un sistema de tubos se inyecta gas a presión para hinchar dicha membrana, esta ejerce un esfuerzo horizontal que debe ser registrado en ciertos puntos de la operación denominados valores de presión A y B (Marchetti S. , 1980). El procedimiento para obtener dichos valores se encuentran normados tanto por la institución ASTM como por Marchetti en sus publicaciones. La presente disertación utilizará los procedimientos y ecuaciones propuestas por la norma ASTM D6635-15, la cual se encuentra vigente hoy en día; Marchetti, en su publicación en Journal of the Geotechnical Division (Marchetti., 1980) propuso el concepto del Dilatómetro a la comunidad ingenieril y con este su procedimiento de uso y ecuaciones para la obtención de índices. Sin embargo, éstas ya no se utilizan ni están reconocidas para su uso investigativo dado que la normativa ASTM estandarizó las correcciones realizadas en el informe TC16 DMT Report.

De acuerdo con (ASTM D6635-15, 2015), el procedimiento inicia con la inserción de del dilatómetro con la ayuda de una plataforma de perforación o un penetrómetro; se debe tomar en cuenta que la paleta debe ser calibrada previo al ensayo, de esta manera se determina los valores ΔA y ΔB, los cuales sirven para corregir las presiones medidas en el ensayo. Posteriormente debe ser introducido en intervalos de 20 cm. Una vez que la hoja se detiene se toman los valores de A y B. El primero cuando la membrana se haya desplazado radialmente 0.05 mm y el segundo cuando el desplazamiento radial sea de 1.10 mm. También cabe destacar que la norma provee un valor denominado presión C el cual mide la despresurización controlada posterior a la obtención de la lectura de presión B (ASTM D6635-15, 2015).

Los valores de presión A y B deben ser corregidos por medio de expresiones propuestas por la norma, estos son denominados p_1 y p_0. Por esta razón se debe calibrar la paleta antes de su uso y hallar los valores ΔA y ΔB (TC16 DMT Report, 2001). La importancia de obtener resultados precisos, tanto de ΔA y ΔB, en suelos blandos es que los valores de A y B son valores pequeños, un poco más altos que ΔA y ΔB, y como la

corrección es la diferencia de estos se requiere sean lo más preciso posible.



Figura 8: Posición adecuada para calibrar la paleta del DMT (TC16 DMT Report, 2001).

Además de lo antes mencionado, para corregir los valores de A y B también se utiliza un valor de presión Z_m el cual refiere al valor medido cuando el aparato se encuentra ventilado a la presión atmosférica. Este valor comúnmente se asume como 0, así este no sea igual a 0, dado que tanto A, B como ΔA, ΔB son medidos por el mismo instrumento. El valor Z_m ya está contemplado en sus ecuaciones respectivas (TC16 DMT Report, 2001).

Las expresiones para determinar p_0 y p_1 propuestas por la norma ASTM son las siguientes:

$$p_0 = 1.05(A - Z_m - \Delta A) - 0.05(B - Z_m - \Delta B)$$

$$p_1 = (B - Z_m - \Delta A)$$

Una vez encontrados estos parámetros podemos hallar tres datos fundamentales, el índice del material (I_d), índice de esfuerzo horizontal (K_d) y el módulo del dilatómetro (E_d). Dichos valores son usados por Marchetti en sus correlaciones (TC16 DMT Report, 2001).

El índice de material provee un perfil del tipo suelo que permite, en suelos normales, generar una descripción del suelo razonable. (Marchetti S. , 1980) relaciona el valor I_d con la fracción del tamaño de partícula que predomina. De este modo podemos clasificar entre limos, arcillas y arenas. Estudios más recientes establecen que este índice no clasifica al suelo por parámetros granulométricos sino por características mecánicas (un "índice de rigidez"). Por esta razón, si en una arcilla la "rigidez" incrementa en comparación con otra arcilla, puede ser que el I_d resultante sea interpretado como un limo (TC16 DMT Report, 2001).

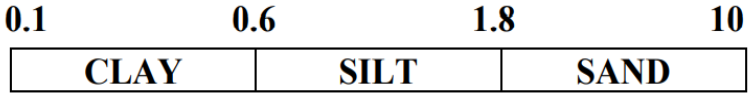


Figura 9: Clasificación del suelo de acuerdo a su Id. (TC16 DMT Report, 2001)

La fórmula para encontrar I_d es la siguiente.

$$I_d = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0}$$

Donde los valores de p_1 y p_0 ya son conocidos y el valor u_0 representa la presión de poros actuante en el suelo antes de la inserción del dispositivo. Esta puede ser provista por algún estudio externo o ser determinada mediante correlación con el valor p_2, pero únicamente en arenas dado que es un material drenante. Si el I_d es mayor o igual a 2 el valor de p_2 puede ser asumido como el valor de la presión de poros. En suelos cohesivos no drenantes este valor es mayor que p_2 debido a la penetración de la hoja (ASTM D6635-15, 2015).

El índice de esfuerzo horizontal representa el índice principal para la correlación *in situ* de esfuerzo horizontal, relación de sobreconsolidación y el corte no drenado en suelos cohesivos. Este valor es muy parecido al coeficiente en reposo de tierras (K_o) con la diferencia que considera los efectos de la penetración de la hoja (ASTM D6635-15, 2015). Está determinada por la siguiente ecuación.

$$K_d = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_v}$$

El esfuerzo vertical efectivo (σ'_v) antes de la inserción del DMT y debe ser hallado una vez que se conozca la densidad del suelo y la altura de los estratos a analizar (ASTM D6635-15, 2015).

El módulo del dilatómetro está basado en un análisis lineal (teoría elástica) y es el principal índice usado para la correlación del módulo de Young (módulo de elasticidad) (ASTM D6635-15, 2015). Se determina mediante la siguiente expresión.

Según (ASTM D6635-15, 2015)

$$E_d = 34.7(p_1 - p_0)\ (MPa)$$

2.1.5. Correlaciones de Marchetti

Marchetti presentó una serie de correlaciones como parte de su estudio en 1980. Estas abarcaban el OCR, K_o, C_u y el valor del módulo edométrico obtenidos mediante de la tendencia de sus valores en relación con los índices I_d, E_d y K_d (Marchetti S. , 1980).

Hoy en día se utiliza el formulario publicado en 2001 por International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering y corregido levemente en la norma ASTM D6635 (TC16 DMT Report, 2001).

K_0	Coeff. Earth Pressure in Situ	$K_{0,DMT} = (K_D / 1.5)^{0.47} - 0.6$	for $I_D < 1.2$
OCR	Overconsolidation Ratio	$OCR_{DMT} = (0.5\ K_D)^{1.56}$	for $I_D < 1.2$
c_u	Undrained Shear Strength	$c_{u,DMT} = 0.22\ \sigma'_{v0}\ (0.5\ K_D)^{1.25}$	for $I_D < 1.2$
Φ	Friction Angle	$\Phi_{safe,DMT} = 28° + 14.6°\ \log K_D - 2.1°\ \log^2 K_D$	for $I_D > 1.8$
c_h	Coefficient of Consolidation	$c_{h,DMTA} \approx 7\ cm^2 / t_{flex}$	t_{flex} from A-log t DMT-A decay curve
k_h	Coefficient of Permeability	$k_h = c_h\ \gamma_w / M_h$ $(M_h \approx K_0\ M_{DMT})$	
γ	Unit Weight and Description	(see chart in Fig. 16)	
M	Vertical Drained Constrained Modulus	$M_{DMT} = R_M\ E_D$ if $I_D \le 0.6$ $R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$ if $I_D \ge 3$ $R_M = 0.5 + 2 \log K_D$ if $0.6 < I_D < 3$ $R_M = R_{M,0} + (2.5 - R_{M,0}) \log K_D$ with $R_{M,0} = 0.14 + 0.15\ (I_D - 0.6)$ if $K_U > 10$ $R_M = 0.32 + 2.18 \log K_U$ if $R_M < 0.85$ set $R_M = 0.85$	

Figura 10: Formulario resumen de correlaciones provistas por Marchetti (TC16 DMT Report, 2001).

Se observa que en la ecuación de corte no drenado interviene el valor de K_d y el esfuerzo vertical efectivo. También se encuentra limitado por el índice de material, el cual corresponde a limos y arcillas, sin embargo, tanto la norma ASTM D6635 como el informe de TC16 recomienda que esta ecuación únicamente sea utilizada sobre arcillas. lo cual limita su uso en depósitos de suelo donde predominen los limos.

En cuanto al módulo de deformación restringido cabe destacar que se obtiene mediante el valor del módulo edométrico. La norma provee expresiones para calcular este parámetro y posee diferentes limitaciones, dadas por el valor de I_d, para encontrar el coeficiente denominado R_M. El producto entre R_M y E_d es el valor del módulo edométrico.

Para la obtención de la densidad no existe una ecuación definida, sin embargo, se presentó un nomograma el cual ayuda a la obtención de este parámetro. En la figura 11 podemos apreciar cómo éste relaciona los valores de E_d con los de I_d, de esta manera la intersección de estos datos marca el valor de la relación del peso unitario de suelo con el peso unitario del agua (γ_s/ γ_w) además de que permite clasificar el material.

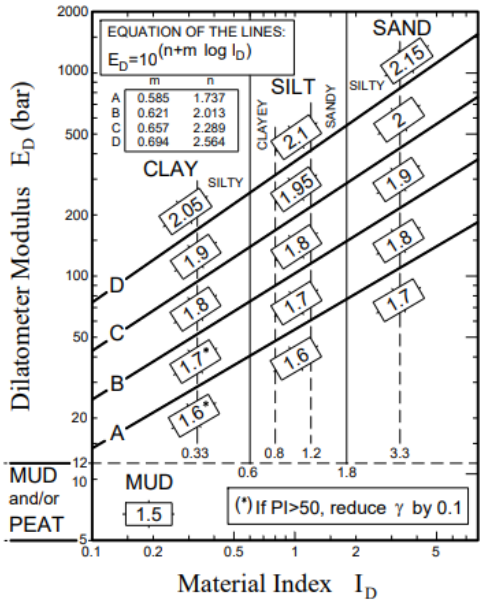


Figura 11: Nomograma que provee el valor de γ_s/γ_w para la obtención de densidad de un suelo (TC16 DMT Report, 2001).

Las correlaciones presentadas previamente son las que actualmente constan en la norma ASTM D6635-15

2.1.6. Resultados DMT

La ejecución del ensayo se realizó en la misma locación de los pozos de perforación para la extracción de muestras. Se realizó la calibración necesaria previa a la inserción del aparato en el suelo en cada uno de los pozos. Estos son los resultados correspondientes de I_d, K_d y E_d para cada uno de los pozos.

P01

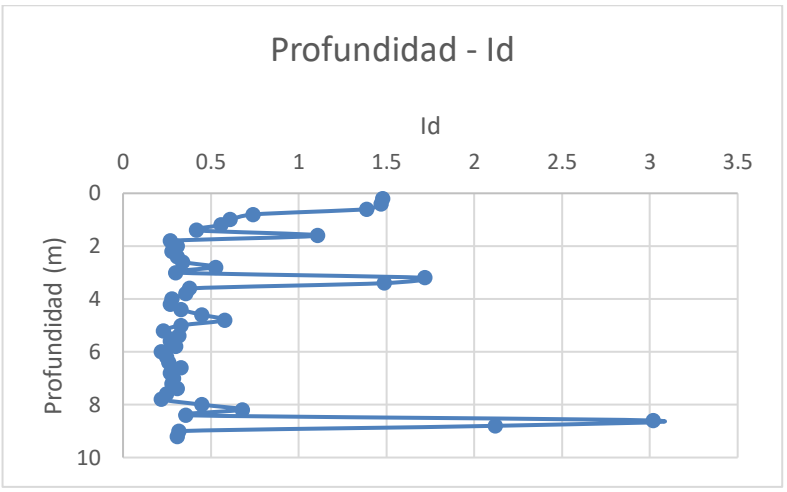


Figura 12: Id con relación a su profundidad pozo 1.

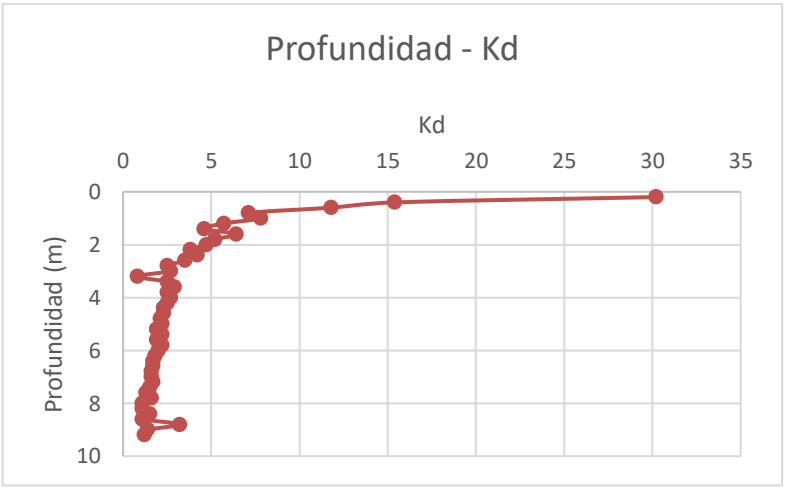


Figura 13: Kd con relación a su profundidad pozo 1.

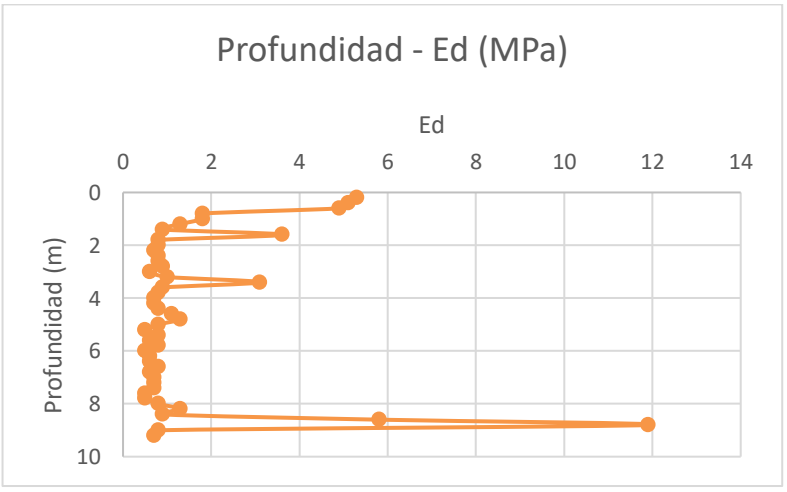


Figura 14: Ed con relación a su profundidad pozo 1.

P02

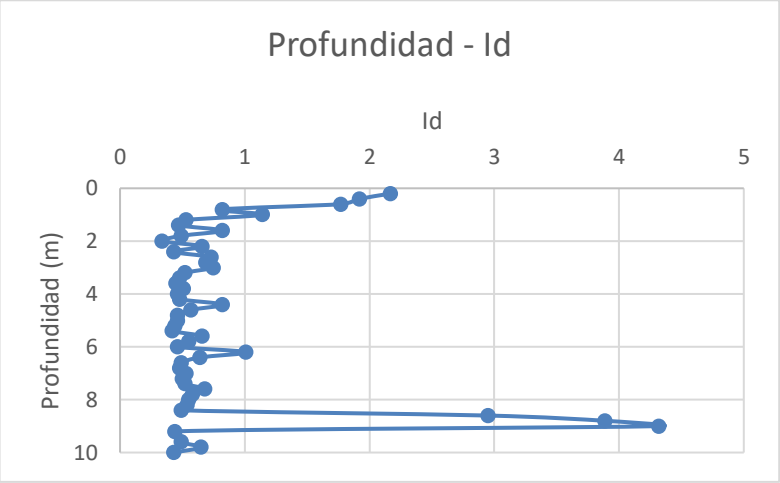


Figura 15: Id con relación a su profundidad pozo 2.

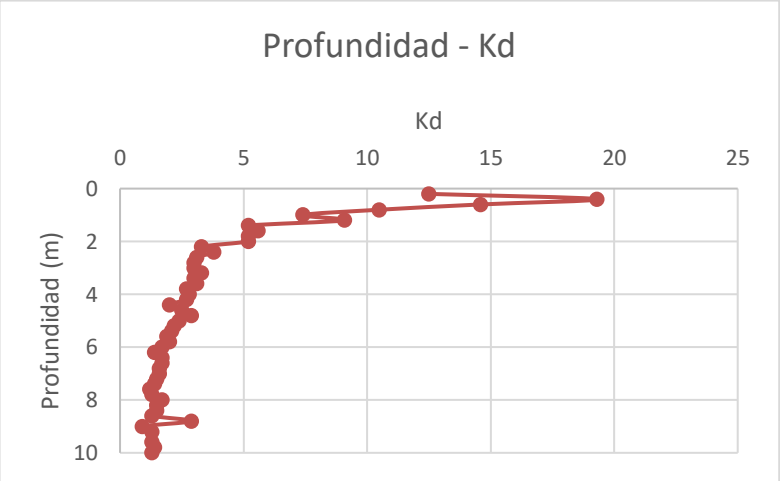


Figura 16: Kd con relación a su profundidad pozo 2.

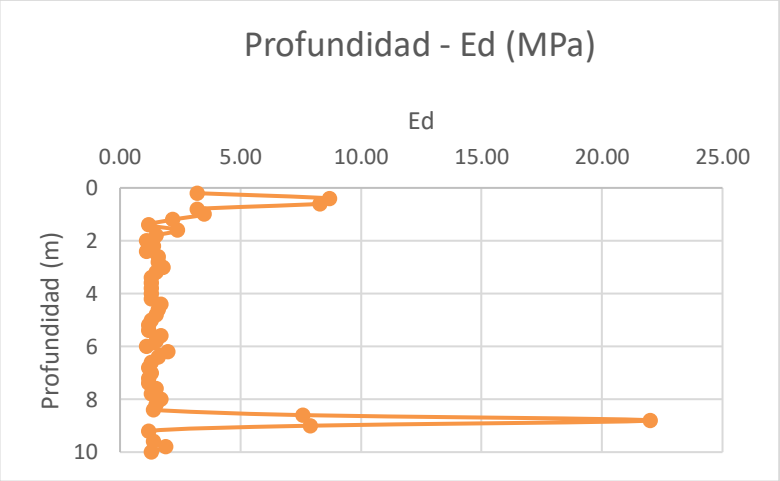


Figura 17: Ed con relación a su profundidad pozo 2.

P03

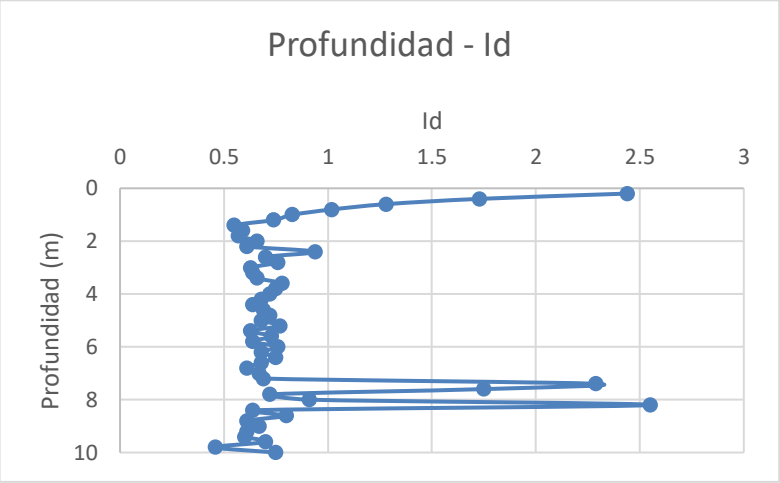


Figura 18: Id con relación a su profundidad pozo 3.

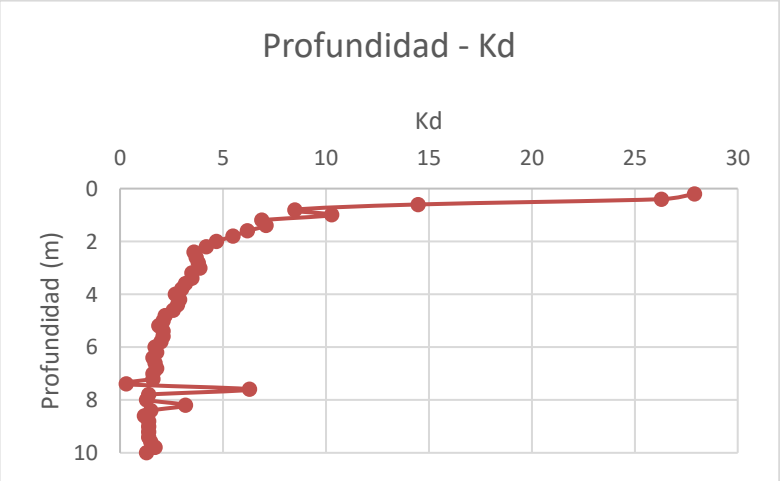


Figura 19: Kd con relación a su profundidad pozo 3.

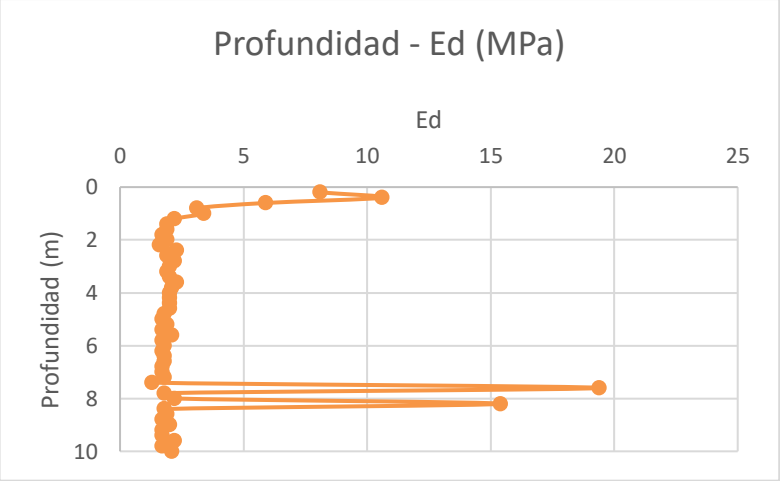


Figura 20: Ed con relación a su profundidad pozo 3.

P04

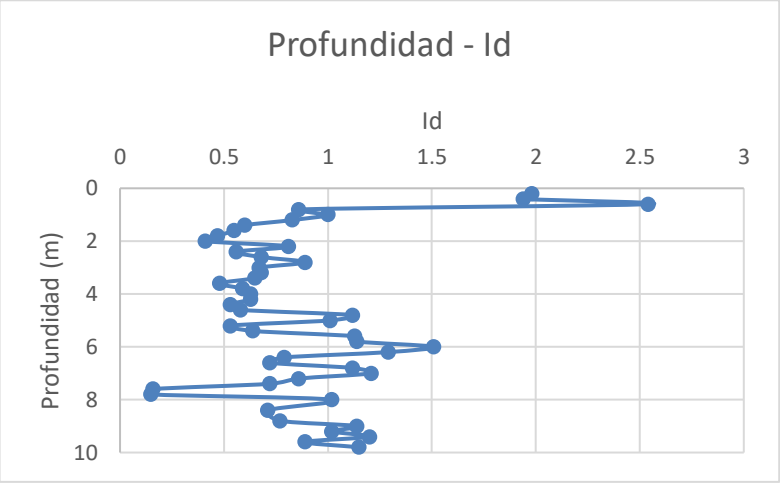


Figura 21: Id con relación a su profundidad pozo 4.

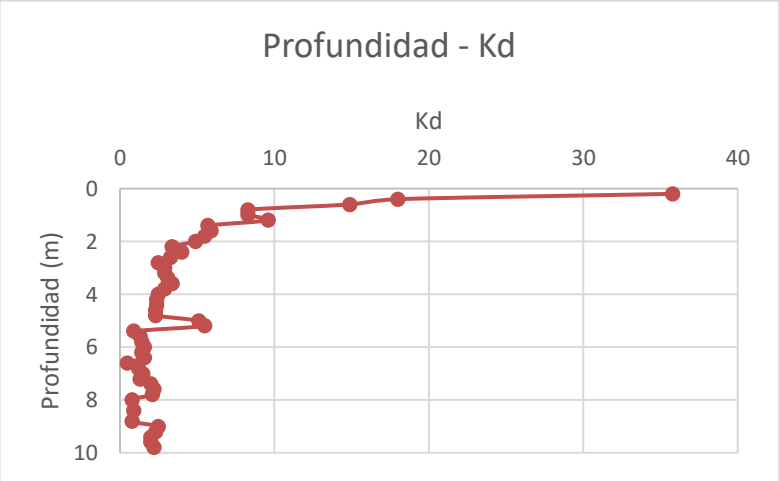


Figura 22: Kd con relación a su profundidad pozo 4.

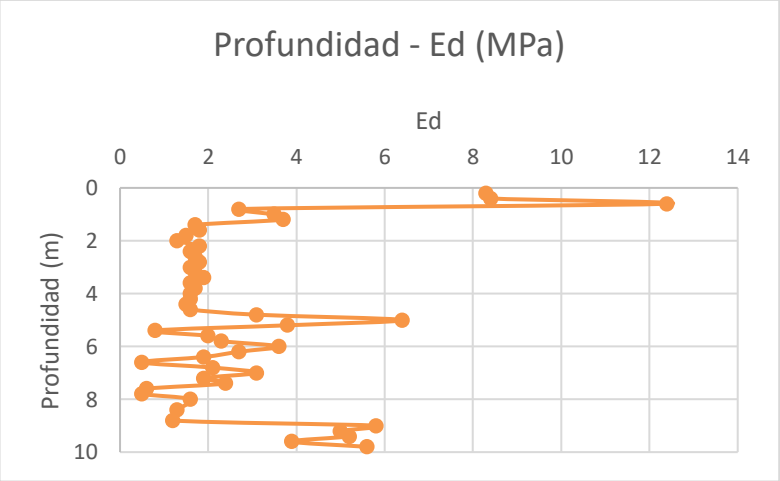


Figura 23: : Ed con relación a su profundidad pozo 4.

Los datos fueron recopilados del informe generado por el software del DMT. Estos coinciden con los valores esperados al tratarse de suelos orgánicos; (TC16 DMT Report, 2001) afirma que los suelos cuyos valores de E_d sean menores o iguales a 12 bares serán considerados orgánicos o turbas (MUD/PEAT). En la disertación del Ingeniero Jorge Albuja también se exponen datos recopilados del DMT en el sector de "Turubamba" y estos son similares con los obtenidos previamente, por lo tanto, se puede concluir que la mayor cantidad de material presente en los pozos es de carácter orgánico, posteriormente la clasificación USCS confirmará detalles más específicos.

Debido a la cantidad de datos por metro de pozo existente en estos parámetros, se optó por sacar un promedio por metro utilizando los valores más coherentes y corrigiendo así las curvas iniciales. Esto permitirá relacionar de manera más adecuada con los parámetros encontrados en laboratorio.

CAPÍTULO III

3. ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1.1. Clasificación de suelos (USCS)

La clasificación de suelos se realizó en todas las muestras extraídas. Se ejecutó los ensayos requeridos por la norma ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), de esta manera se obtuvo los datos necesarios para la clasificación del material. También, como se mencionó antes, dada la naturaleza del suelo se optó por cuantificar la cantidad de materia orgánica en las muestras analizadas.

3.1.2. Contenido de humedad

Los pormenores de este ensayo y el procedimiento a seguir se encuentran estipulados en la norma ASTM D2216. En todas las muestras se homogenizo el material y se llenó dos cápsulas de humedad, previamente pesadas, con el material mínimo requerido, el cual es 40 gramos, y se volvió a tomar la masa del conjunto. Después de 24 horas se registró el peso final del conjunto una vez que el suelo se encuentre seco. De esta manera mediante diferencia de pesos se obtuvo el contenido de humedad del material.

En cuanto a los resultados, podemos observar que la mayoría de las muestras sobrepasa el 100% de humedad. Esto quiere decir que el material encontrado posee grandes cantidades de agua, exceptuando el primer metro de cada pozo donde el contenido de humedad es menor. Además, en la figura 24 se observa el comportamiento errático que tiene la humedad ya que no posee una tendencia definida, no obstante, hay secciones con valores similares. También cabe destacar que la diferencia entre la humedad producto de dos cápsulas debe ser menor a 1%, sin embargo, existen ciertas muestras que superan este valor. Esto se debe a que, a pesar de haber homogenizado el material previo al ensayo, es imposible controlar que dos cápsulas diferentes contengan la misma cantidad de contenido orgánico (fibras, raíces, pedazos de madera, etc).

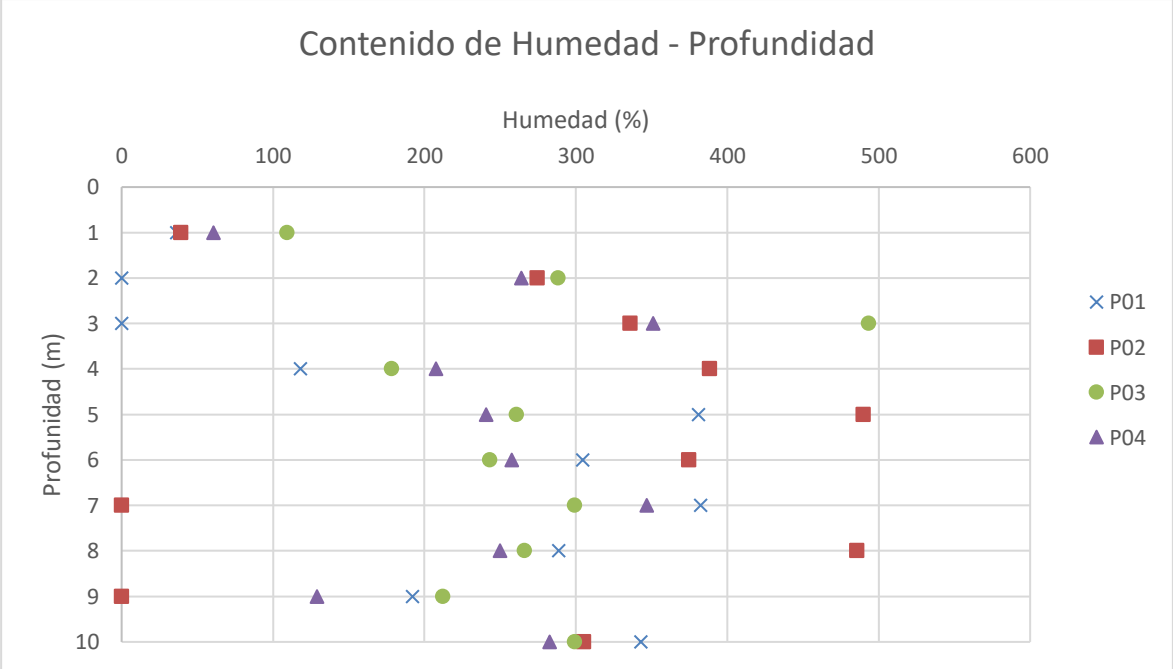


Figura 24: Contenido de humedad con relación a la profundidad.

3.1.3. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Parte crucial dentro de la clasificación del suelo es la obtención de los límites líquido y plástico, estos sirven para cuantificar que tan plástico es un suelo. De acuerdo con (ASTM D653, 2022) "la plasticidad es la propiedad del suelo para deformarse, sobrepasando el punto del cual ya no puede recuperar su forma original, sin que este se agriete o se aprecie un cambio de volumen considerable". El procedimiento a realizar en ambos ensayos se encuentran descritos en la norma ASTM D4318; de igual manera se utilizó la copa de Casagrande para ejecutar el método "unipunto" el cual determina si el suelo es orgánico cuando la relación entre el límite líquido secado en horno es menor a 75% del límite líquido original. Cabe destacar que ambos limites deben tener la misma cantidad de golpes (entre 20 y 30) para poder ser comparados.

Debido a la presencia de contenido orgánico en la mayoría se complicó la ejecución de los ensayos puesto que al momento de realizar el procedimiento en la copa de Casagrande (límite líquido) este material presentaba un comportamiento errático. Quiere decir que con una cantidad aleatoria de agua la copa pudo registrar diferente cantidad de golpes en pruebas distintas. De igual manera al hacer los rollos de 3 mm, para la determinación del límite plástico, el material tuvo que perder una gran cantidad de agua antes de ejecutar el ensayo. Este problema presente en todos los suelos orgánicos y turba, de acuerdo con el trabajo presentado por el Ing, Jorge Albuja "Mechanical Properties of Peats", se debe a la presencia

de altos valores de contenido de agua y sobre todo a las fibras y contenido orgánico. Estos sufren un reacomodo no controlable, concluyendo así que realizar límites en suelos orgánicos resulta difícil y presentan resultados que difieren de su estado *in situ* ya que deben ser modificados de cierta manera para poder ser realizados.



Figura 25: Ensayo para hallar el límite liquido (izq) y ensayo para hallar límite plástico (der).

En cuanto al método “unipunto”, necesariao para determinar si el material es orgánico o no, cabe resaltar que la mayoría de las muestras después del secado perdía plasticidad y resultaba imposible obtener más de 20 golpes. Por lo tanto, se concluyó que el contenido orgánico, junto con el suelo fino, aporta plasticidad al material. Una vez que el espécimen sale del horno este ha perdido cierta cantidad de contenido orgánico comprobando así que dicho material es orgánico.



Figura 26: Material seco el cual perdió plasticidad para realizar el ensayo unipunto.

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico y es un parámetro necesario dentro de la clasificación de suelos plásticos. La interacción entre el límite líquido y el índice de plasticidad está definida como la carta de plasticidad dentro de la norma ASTM D2487, y sirve para denominar al suelo según su plasticidad.

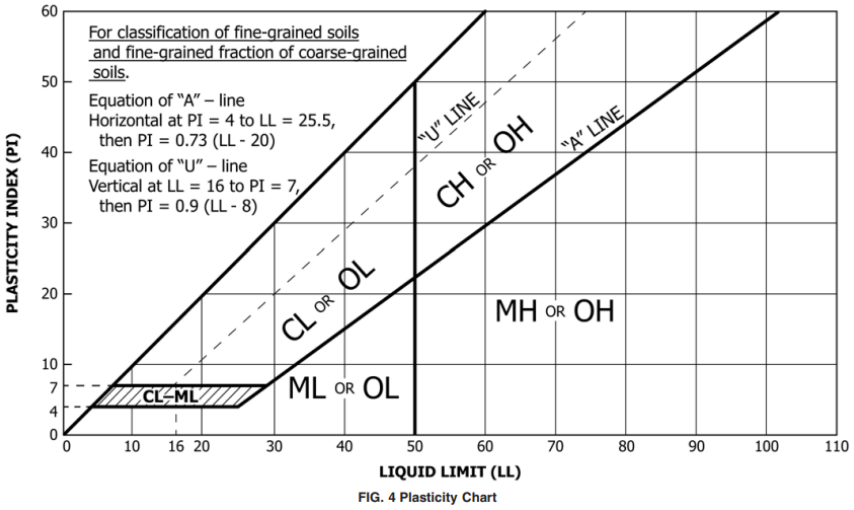


FIG. 4 Plasticity Chart

Figura 27: Carta de plasticidad (ASTM D2487, 2022).

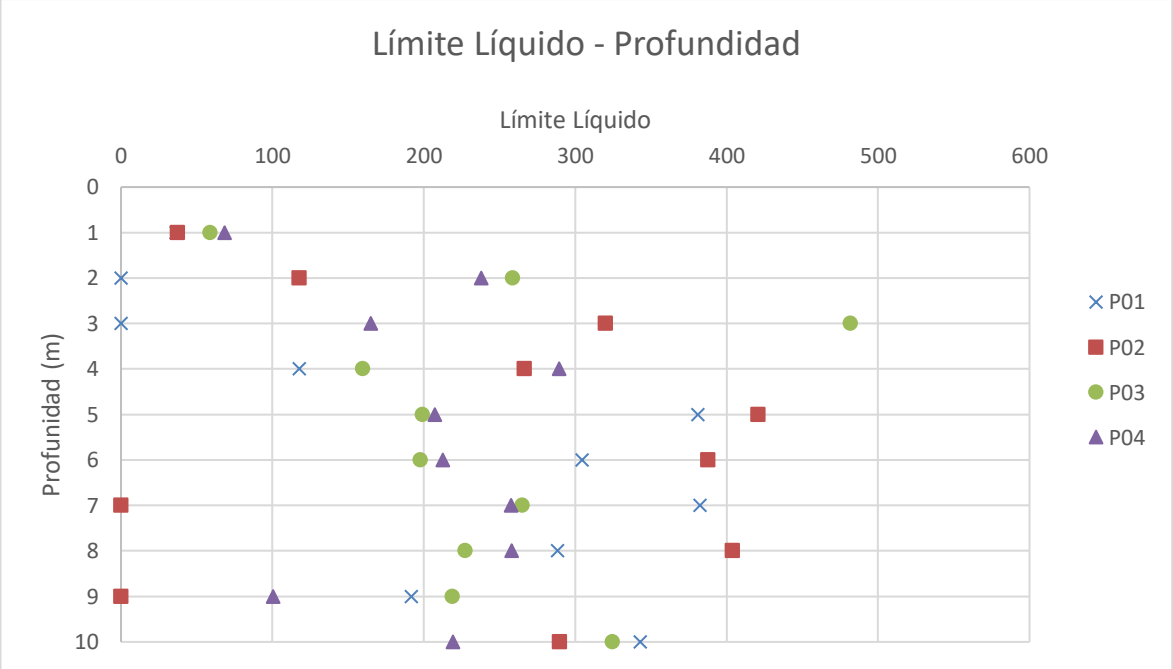


Figura 28: Límite líquido con relación a la profundidad.

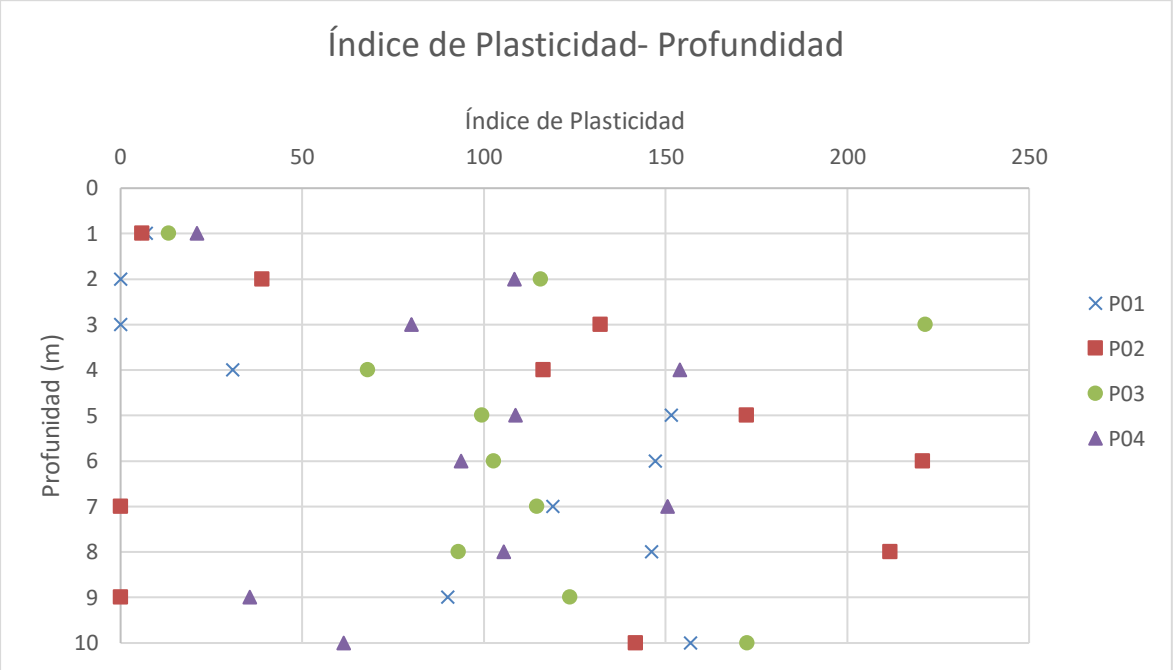


Figura 29: Índice de plasticidad con relación a la profundidad.

3.1.4. Granulometría

Las muestras fueron sometidas al ensayo de granulometría por lavado dado que para conocer la cantidad de finos (material pasante del tamiz 200) se debía remover las raíces y contenido orgánico presente en las muestras. Se realizó utilizando el procedimiento descrito

en el método A de la norma ASTM D1140, el cual consiste en tomar una muestra representativa de suelo, inundarlo, para que la mayor cantidad de material se separe, y vaciar el contenido en el tamiz 200 para posteriormente lavarlo, con cuidado, de esta manera el material fino, con ayuda del agua, atraviesa la malla (ASTM D1140, 2022).



Figura 30: Material siendo sometido a granulometría por lavado.

Los resultados, expuestos en la figura, presentan que en todas las muestras la mayor cantidad de material atravesó el tamiz 200, dejando así retenido en el resto de los tamices (N° 4, 10, 40 y 200). También cabe destacar que parte del material lavado resultaba ser contenido orgánico en las muestras orgánicas, pero el porcentaje de este se encuentra detallado en la sección 3.1.4.

Como conclusión podemos afirmar que todas las muestras tienen mayormente material fino. La norma ASTM D2487 menciona que si el 50% o más de la muestra analizada atraviesa el tamiz 200 el espécimen está compuesto mayormente de finos, sin embargo, aún queda determinar si este material corresponde a un limo o una arcilla. Es necesario mencionar que no se encontró grava ni arena gruesa en las muestras, el material retenido en los tamices 200 y 40 nos dan a entender que existe buena cantidad de arena fina en los especímenes ensayados.



Figura 31: Materia orgánica retenida sobre el tamiz 200 (izq) y arena retenida sobre el tamiz 200 (der).

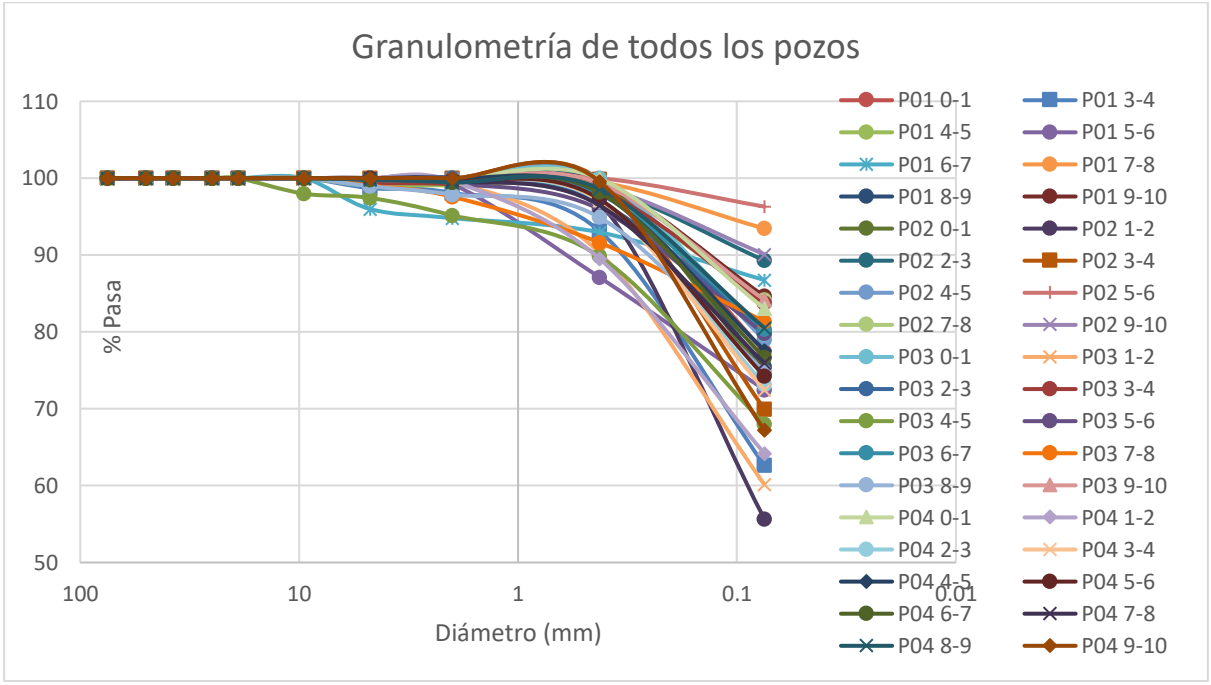


Figura 32: Granulometría conjunta de los cuatro pozos.

3.1.5. Contenido orgánico

Según (Das B. , 2001) los suelos donde existe alta presencia de materiales orgánicos en descomposición, debido a la presencia de plantas acuáticas que surgen por el alto contenido de agua freática, se los conocen como turbas. La mezcla de suelos inorgánicos con un gran porcentaje da origen a los suelos parcialmente orgánicos. Para conocer la cantidad de

materia orgánica presente en una muestra es necesario determinar el porcentaje de peso seco restante después de haberla sometido a un proceso de incineración. Este valor es más conocido como contenido de cenizas. La diferencia de este porcentaje en relación con el 100% es el contenido orgánico presente en la muestra. Este ensayo y la obtención de sus resultados se encuentran prescritos en la norma ASTM D2974.



Figura 33: Material sometido al ensayo de incineración.

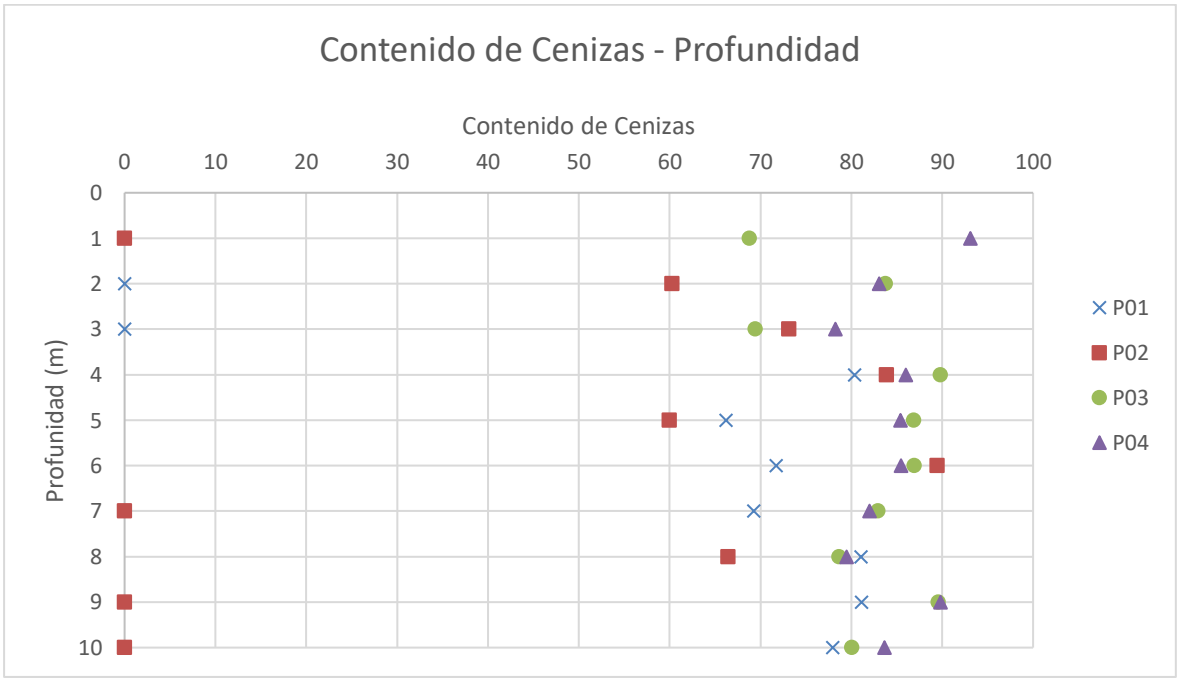


Figura 34: Contenido de ceniza con relación a la profundidad.

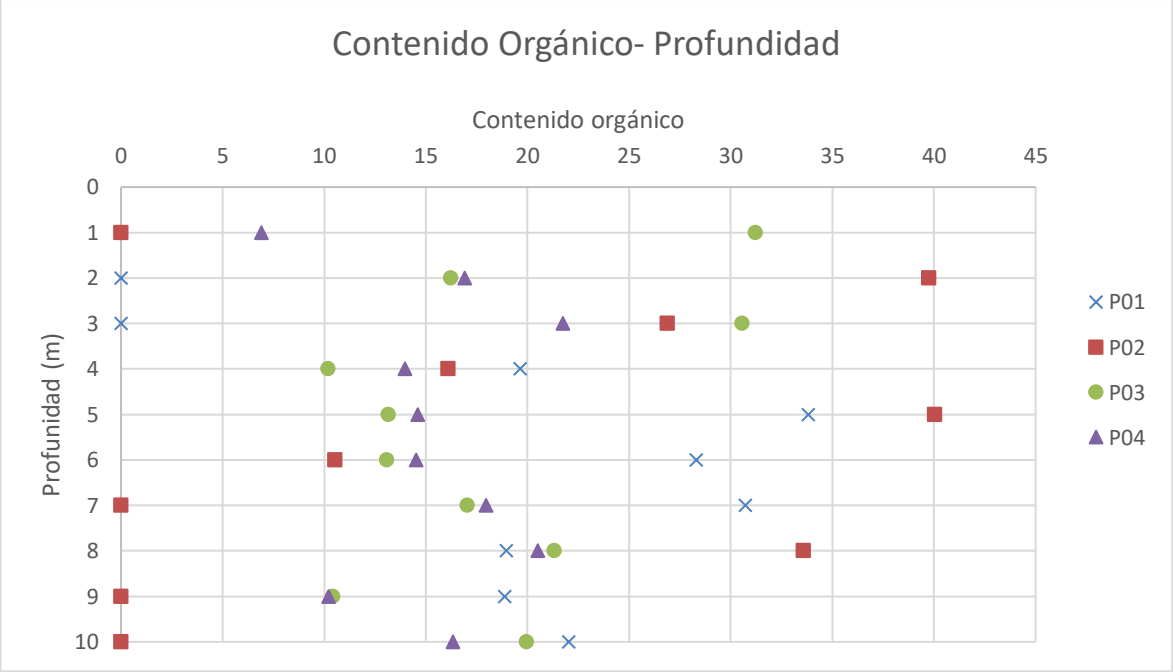


Figura 35: Porcentaje de contenido orgánico con relación a la profundidad.

Los resultados de contenido de cenizas tienen una tendencia muy bien marcada, los valores oscilan entre 60% y 95%. La norma ASTM D4427, relacionada con la clasificación de turbas, nos provee una clasificación del material de acuerdo con su contenido de cenizas.

Bajo contenido de cenizas	Turbas con menos de 5% de cenizas
Medio contenido de cenizas	Turbas entre 5% y 15% de cenizas
Alto contenido de cenizas	Turbas con más de 15% de cenizas

Figura 36: Clasificación del suelo según su contenido de cenizas (ASTM D4427, 2022).

La norma ASTM D653 menciona que para distinguir a una turba de un suelo orgánico esta debe poseer menos de 25% de contenido de ceniza. En base a los resultados del ensayo realizado el material posee un alto contenido de cenizas y un contenido orgánico que oscila entre el 0% y el 40%, por lo tanto, corresponde a un suelo orgánico.

3.1.6. Resumen de resultados.

Esta sección presenta los resultados, por metro de perforación, de los ensayos expuestos previamente y su clasificación correspondiente.

P01

Profundidad (m)	Humedad (%)	LL	LP	IP	Orgánico	Contenido de cenizas	Contenido orgánico	Tipo de suelo
0-1	40.74	36.37	29.35	7.02	No	0	0	ML, Limo con arena
1-2	0	0	0	0	NA	0	0	NA
2-3	0	0	0	0	NA	0	0	NA
3-4	276.38	117.98	87.17	30.81	Si	80.35	19.65	OH, Limo orgánico arenoso
4-5	527.32	381.09	229.54	151.55	Si	66.17	33.83	OH, Limo orgánico con arena
5-6	554.39	304.63	157.42	147.21	Si	71.69	28.30	OH, Limo orgánico con arena
6-7	520.98	382.52	263.59	118.93	Si	69.28	30.72	OH, Limo orgánico
7-8	223.88	288.55	142.45	146.1	Si	81.03	18.97	OH, Limo orgánico
8-9	195.91	191.94	101.88	90.06	Si	81.12	18.88	OH, Limo orgánico con arena
9-10	499.98	342.92	186.07	156.85	Si	77.96	22.04	OH, Limo orgánico con arena

Tabla 5: Resumen parámetros clasificación pozo 1.

P02

Profundidad (m)	Humedad (%)	LL	LP	IP	Orgánico	Contenido de cenizas	Contenido orgánico	Tipo de suelo
0-1	39.15	37.52	31.63	5.89	No	0	0	ML, Limo con arena
1-2	274.39	117.94	79.07	38.87	Si	60.24	39.76	OH, Limo orgánico arenoso
2-3	335.72	320.19	188.22	131.97	Si	73.1	26.9	OH, Limo orgánico
3-4	388.33	266.67	150.3	116.37	Si	83.89	16.11	OH, Limo orgánico arenoso
4-5	489.88	420.82	248.61	172.21	Si	59.96	40.04	OH, Limo orgánico con arena
5-6	374.55	387.87	167.12	220.75	Si	89.47	10.53	OH, Limo orgánico
6-7	0	0	0	0	NA	0	0	NA
7-8	485.71	403.8	192.03	211.77	Si	66.42	33.58	OH, Limo orgánico con arena
8-9	0	0	0	0	NA	0	0	NA
9-10	305.18	289.92	148.19	141.73	Si	0	0	OH, Limo orgánico

Tabla 6: Resumen parámetros clasificación pozo 2.

P03

Profundidad (m)	Humedad (%)	LL	LP	IP	Orgánico	Contenido de cenizas	Contenido orgánico	Tipo de suelo
0-1	109.39	58.85	45.59	13.26	Si	68.77	31.23	OH, Limo orgánico con arena
1-2	288.3	258.95	143.32	115.63	Si	83.77	16.23	OH, Limo orgánico arenoso
2-3	493.22	481.83	260.43	221.4	Si	69.42	30.58	OH, Limo orgánico con arena
3-4	178.36	159.7	91.7	68	Si	89.81	10.19	OH, Limo orgánico con arena
4-5	260.82	199.2	99.8	99.4	Si	86.85	13.15	OH, Limo orgánico arenoso
5-6	243.07	197.95	95.25	102.7	Si	86.92	13.08	OH, Limo orgánico con arena
6-7	299.12	265.21	150.7	114.51	Si	82.94	17.06	OH, Limo orgánico con arena
7-8	266.08	227.43	134.46	92.97	Si	78.66	21.34	OH, Limo orgánico con arena
8-9	212.11	219.09	95.47	123.62	Si	89.56	10.44	OH, Limo orgánico con arena
9-10	299.22	324.52	152.17	172.35	Si	80.04	19.96	OH, Limo orgánico con arena

Tabla 7: Resumen parámetros clasificación pozo 3.

P04

Profundidad (m)	Humedad (%)	LL	LP	IP	Orgánico	Contenido de cenizas	Contenido orgánico	Tipo de suelo
0-1	60.66	68.45	47.38	21.07	Si	93.09	6.91	OH, Limo orgánico con arena
1-2	264.02	238.17	129.85	108.32	Si	83.08	16.92	OH, Limo orgánico arenoso
2-3	351.01	164.97	84.94	80.03	Si	78.26	21.74	OH, Limo orgánico con arena
3-4	207.7	289.37	135.46	153.91	Si	86.01	13.99	OH, Limo orgánico con arena
4-5	240.76	207.29	98.65	108.64	Si	85.39	14.61	OH, Limo orgánico con arena
5-6	257.5	212.69	118.99	93.7	Si	85.47	14.53	OH, Limo orgánico con arena
6-7	346.91	257.74	107.2	150.54	Si	82.02	17.98	OH, Limo orgánico con arena
7-8	249.88	258.11	152.72	105.39	Si	79.49	20.51	OH, Limo orgánico con arena
8-9	129.01	100.74	65.26	35.48	Si	89.78	10.22	OH, Limo orgánico con arena
9-10	282.83	219.32	157.88	61.44	Si	83.66	16.34	OH, Limo orgánico arenoso

Tabla 8: Resumen parámetros clasificación pozo 4.

El resumen provisto hace evidencia de que el suelo analizado posee una matriz compuesta principalmente de limos orgánicos. Vale la pena destacar que el suelo superficial posee poca cantidad de material orgánico y en el caso de los dos primeros pozos este valor es nulo.

3.1.7. Obtención de densidad

La densidad del suelo es un parámetro importante y altamente utilizado dentro de la mecánica de suelos y geotecnia, por esta razón es necesario poseer datos certeros.

Para hallar los valores de densidad presentes en la zona de análisis las muestras fueron sometidas a los procesos designados en la norma ASTM D7263, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens. De una muestra de suelo es obtenida la densidad como la relación de su masa en estado natural con su volumen, volumen obtenido mediante el principio de Arquímedes. Dado que el suelo es poroso, previo a su inserción en agua, éste debe ser recubierto con parafina y el peso de esta debe ser considerada en los cálculos para la obtención de resultados (ASTM D7263, 2022).

En cuanto a las densidades obtenidas, después de analizar las muestras disponibles es remarcable el hecho que los valores oscilan mayormente alrededor de 1 g/cm^3, siendo más altos tanto en la parte superior como en la parte inferior de cada pozo. Sin embargo, estos fueron los valores esperados. Los suelos orgánicos, por su composición, son más ligeros; los poros en suelos orgánicos son ocupados por las fibras y raíces características de este material (materia orgánica), y estas al ser muy ligeras y ocupar bastante volumen hacen que pese mucho menos en relación con otros materiales (Salamanca & Sadeghian, 2005). Durante los ensayos se comprobó que, en ciertos casos, el material resultaba ser más ligero que el agua y esto no permitió que las muestras recubiertas en parafina se sumerjan en el contenedor con agua. Para solucionar esta condición se optó por cambiar el líquido en el que las muestras eran sumergidas, este debía ser menos denso que el agua, así se empleó Diesel comercial con una densidad de 0.84 g/cm^3, de esta manera se pudo comprobar que en este tipo de suelo es preferible utilizar fluidos con está características para evitar la flotación; hay que destacar que si bien el cambio de agua a Diesel ayudó a solucionar este problema, se debe tomar en cuenta el cambio de densidad del fluido en los cálculos dado que esta es una variable.

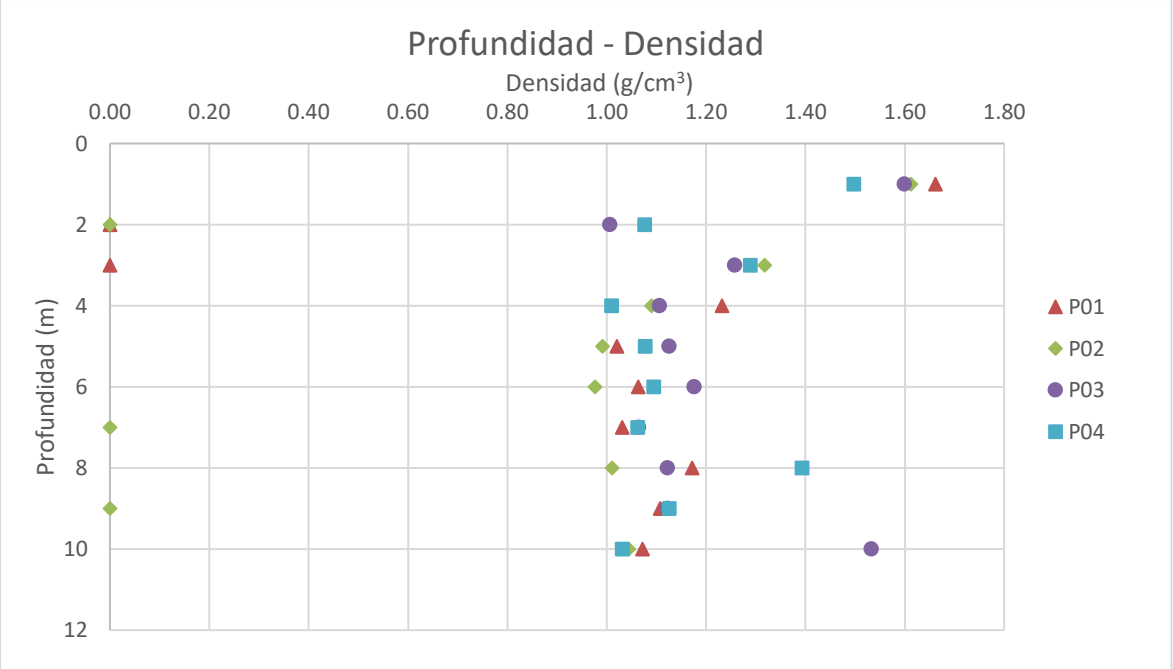


Figura 37: Densidad con relación a la profundidad.

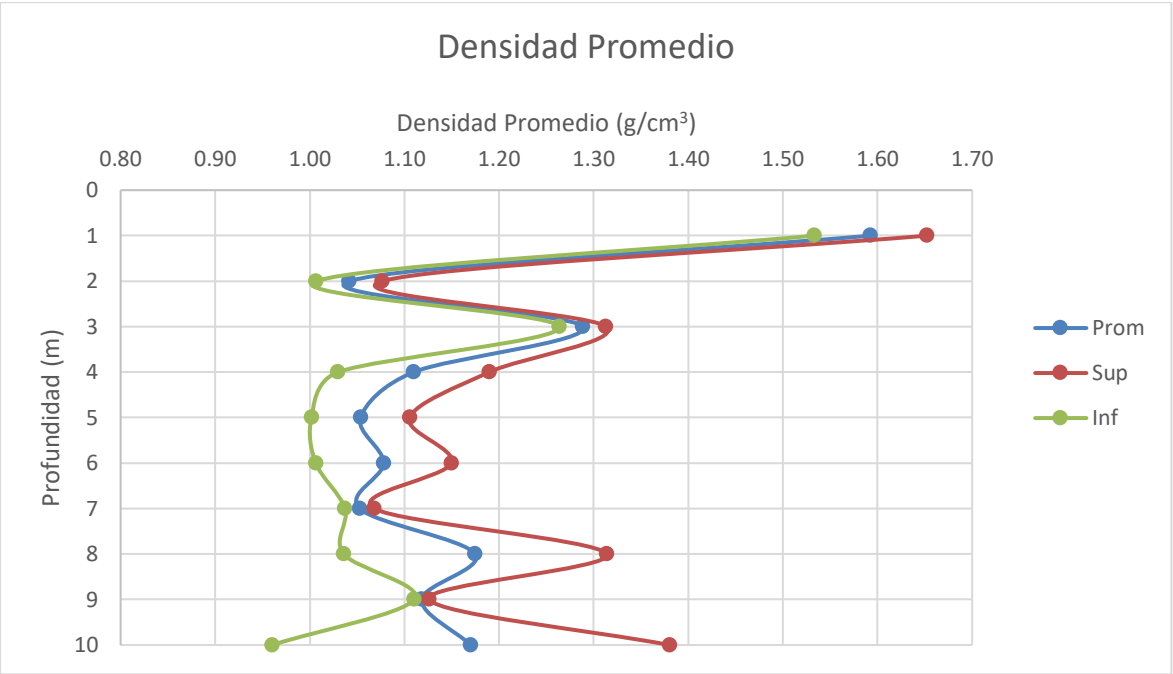


Figura 38: Densidad promedio de los 4 pozos junto con su desviación estándar en relación a la profundidad.

Los valores de densidad también fueron útiles para ajustar de manera correcta el valor del confinamiento para las probetas sometidas a ensayo triaxial. En el anexo 2 se puede evidenciar los valores de confinamiento asumidos.

3.1.8. Gravedad específica

Si bien se tuvo en consideración hallar la gravedad especifica de las muestras recuperadas, existieron varios percances que dificultaron esta tarea a tal punto de no poder ser realizada en el laboratorio. En primer lugar, la escasez de material requirió que este sea priorizado en los ensayos con más importancia. Además, el material, por su composición, al ser sumergido en los picnómetros hubiera quedado suspendido sin que este se asiente en la base, esto conllevaría a resultados errados. Es recomendable encontrar la gravedad especifica del contenido orgánico y semejantes por separado dado que estos son los que tienden a ser más ligeros que el agua y utilizar picnómetros con inyección de gas helio automático para obtener resultados más acertados (Albuja J. D., 2016).

A pesar de lo antes mencionado, se optó por utilizar correlaciones que nos otorguen valores de gravedad específica. Se utilizó dos expresiones que relacionan la gravedad especifica con el contenido de cenizas de las muestras, esto tomando en cuenta que estamos trabajando con material orgánico.

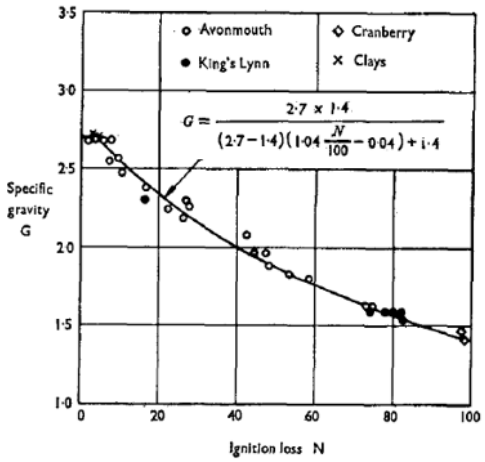


Figura 39: Relación entre la gravedad especifica del suelo y su contenido de ceniza (Skempton & Petley, 1970).

Con la expresión expuesta en la figura 39 (Skempton & Petley, 1970) se obtuvo valores de gravedad especifica que oscilan entre 1.45 y 1.75 para las muestras analizadas.

En el trabajo publicado por (Li, y otros, 2020) se presenta una curva que relaciona de igual manera el contenido de ceniza con la gravedad especifica de un material, con la diferencia que ésta recopila la información de otras investigaciones realizadas con material orgánico.

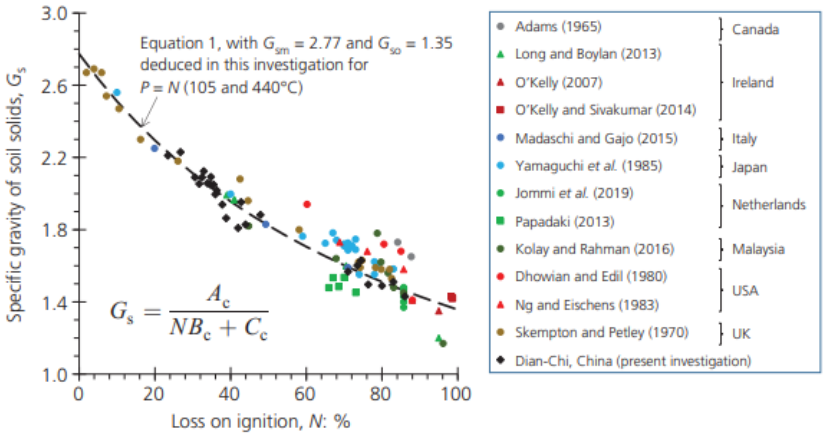


Figura 40: Relación entre la gravedad específica y el contenido de ceniza. (Li, y otros, 2020)

Haciendo uso de la expresión de la figura 40 se obtuvo valores muy similares a los obtenidos con la correlación de la figura 39. En este caso los valores oscilan entre 1.40 y 1.70, sin embargo, en el anexo 2 se puede visualizar los valores que adopta cada muestra con cada una de las expresiones propuestas.

3.1.9. Ensayo triaxial

La ejecución de ensayos triaxiales nos proveyó las variables restantes para la conclusión de esta disertación, el módulo de deformación restringido y el corte no drenado. Se realizó un total de 31 pruebas triaxial no consolidado-no drenado donde las probetas fueron saturadas y ensayadas de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM D2850, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils. Es necesario recalcar que la norma ASTM D2850 menciona el uso de 3 probetas, y de ser el caso mínimo 2, para una correcta obtención y análisis de resultados. Dada la falta de material o que en si este no fue apto para ser moldeado hay ciertas pruebas que se realizaron utilizando únicamente una probeta; si bien se considera que los resultados provistos fueron errados, desde un punto de vista teórico no lo están. Los suelos blandos, como la arcilla, al someterse al ensayo Triaxial UU saturado tienden a presentar una envolvente de Mohr-Coulomb completamente horizontal, lo que quiere decir que el suelo es puramente cohesivo dado que el ángulo de fricción es igual a 0 (φ=0), esto se debe a que el material no drena en ninguna de sus probetas, por lo tanto, la carga aplicada es soportada únicamente por el poro con agua así el esfuerzo desviador aumente.

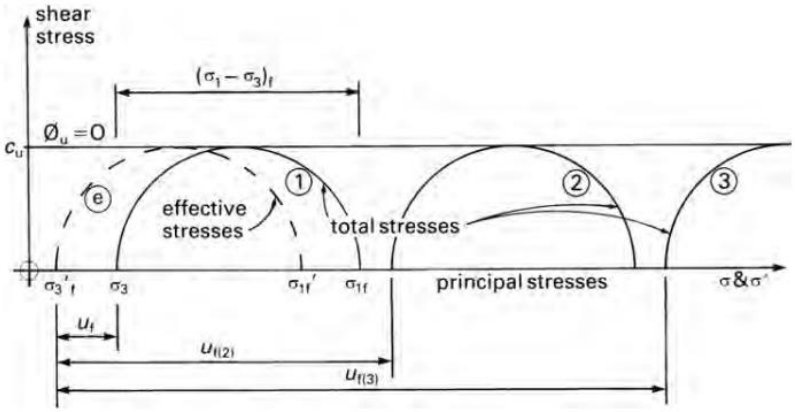


Figura 41: Comportamiento de suelos saturados al ser sometidos a triaxiales UU (Head & Epps, 2014).

Tomando en cuenta este comportamiento, las pruebas en las cuales únicamente se ensayó una probeta se usó el valor del radio para obtener el corte no drenado.

En cuanto al confinamiento aplicado a las muestras, se utilizó el valor de densidad previamente obtenido para determinar el esfuerzo total *in situ* de cada muestra. De acuerdo con (Head & Epps, 2014) es apropiado utilizar el valor del esfuerzo efectivo *in situ* en la primera probeta, el doble de ese valor en la segunda probeta y para la tercera es recomendable aplicar tres o cuatro veces el confinamiento inicial. Es importante tomar en cuenta que el aplicar un esfuerzo menor al valor *in situ* en materiales como arcillas normalmente consolidadas, podría dejarlas en un estado de sobreconsolidación. Por este motivo, utilizando el valor de densidad encontrado previamente, se confinó las muestras según lo sugerido en la guía citada con valores no menores a los calculados.

La importancia de la saturación radica en la medición de la presión de poros, sobre todo en los triaxiales no drenados-no consolidados puesto que esta es la medición de la carga soportada por el agua. En suelos parcialmente saturados actúan en conjunto la presión de poros de agua y la presión de poros de aire, este último dificulta demasiado la medición de una presión de poros. Para solucionar este percance y facilitar el ensayo se opta por saturar las muestras. El proceso de saturación consiste en aumentar la presión de poros para que el agua absorba los vacíos de aire en la muestra, esto mediante el incremento alterno entre la presión de la celda y la presión *back*, una vez que la muestra se encuentre confinada en la cámara. Para asegurarnos que la muestra se encuentra saturada se debe comprobar mediante el coeficiente de presión de poros de Skempton denominado *B*, este tiene que alcanzar un valor mínimo de 0.95 para considerar virtualmente que la muestra se encuentra saturada. Por la composición de las muestras analizadas para este trabajo pudimos haber asumido que ya se encontraban saturadas previo al ensayo, sin embargo, estos valores fueron comprobados y, en

caso de ser necesario, se aplicó el procedimiento necesario para saturar las muestras que lo requieran (Head & Epps, 2014). En la tabla 9 se expone un resumen de la saturación presente en cada muestra previo al ensayo de compresión.

Profundidad (m)	Coeficiente B							
	P01		P02		P03		P04	
1	0.96		0.96		0.95		0.97	
2			0.96	0.97	0.96	0.96		
3			0.96	0.96	1.11	0.98	0.96	
4				0.97			0.98	0.96
5	0.99	0.98	0.96	0.96			0.99	0.99
6	1.02	0.95	0.98	0.96	0.99	0.97	0.96	0.95
7	1.06				0.95	0.99	0.98	
8	0.96	0.97	0.96	0.97	0.96	0.98	0.95	0.95
9	0.97	0.96			1.07	0.97		
10	0.98	0.98	0.96		1.02	0.97	0.96	0.96

Tabla 9: Valor de B en cada una de las probetas previas a ser sometidas a compresión.

Todas las muestras analizadas se encuentran saturadas de acuerdo con lo establecido previamente y se desconoce la razón concreta en cuánto al por qué ciertas muestras presentan un valor B mayor a 1,.Sin embargo, partiendo desde la ecuación definida para obtener el coeficiente B (figura 42), ésta relaciona la compresibilidad del agua, la cual es muy baja, con la compresibilidad del suelo, la cual es alta en comparación, y dado que el resultado de esta división es más pequeño a medida que la compresibilidad del suelo aumenta, obtendríamos que el valor máximo que se puede obtener es de 1, por lo tanto, clasificaríamos a cualquier dato que sea mayor a este como un error del sistema, y , asumiríamos a estos como 1 puesto que es ilógico obtener valores mayores a la unidad (Head & Epps, 2014).

$$B = \frac{1}{1 + \frac{nC_w}{C_s}}$$

Figura 42: Ecuación deducida para el cálculo de B (Head & Epps, 2014).

3.1.10. Resultados

En esta sección se presentan las observaciones y los valores de corte no drenado y módulo de deformación restringido hallados una vez procesada la información provista por los ensayos triaxiales. Dada la complejidad de material analizado existen discrepancias en cuanto a los valores esperados, sin embargo, se ha recopilado los datos más coherentes para

su uso posterior. El criterio para cada parámetro está expuesto en su sección correspondiente.

3.1.11. Corte no drenado

El corte no drenado es un parámetro geomecánico de alta relevancia en cálculos y análisis geotécnicos. De acuerdo con (INEN 685, 1982, 4) se define como "parte de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo debido a la atracción molecular entre las partículas, es determinada por la intersección de la envolvente de falla con el eje vertical en el diagrama de Mohr."

Para este trabajo se obtuvo los valores de corte no drenado, en esfuerzos totales, utilizando muestras saturadas y evitando el drenaje en estas, en la figura 41 se encuentras los datos obtenidos y adicionalmente la figura 43 presenta el promedio de corte no drenado de los 4 pozos por metro de profundidad y su relación con la desviación estándar.

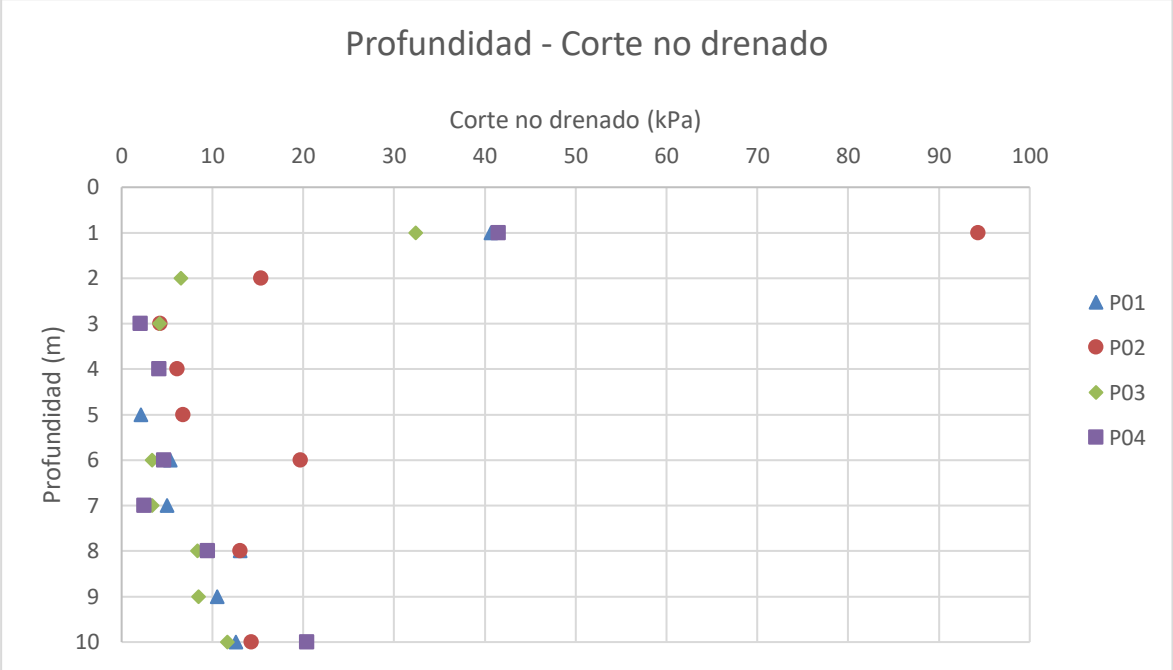


Figura 43: Corte no drenado con relación a la profundidad.

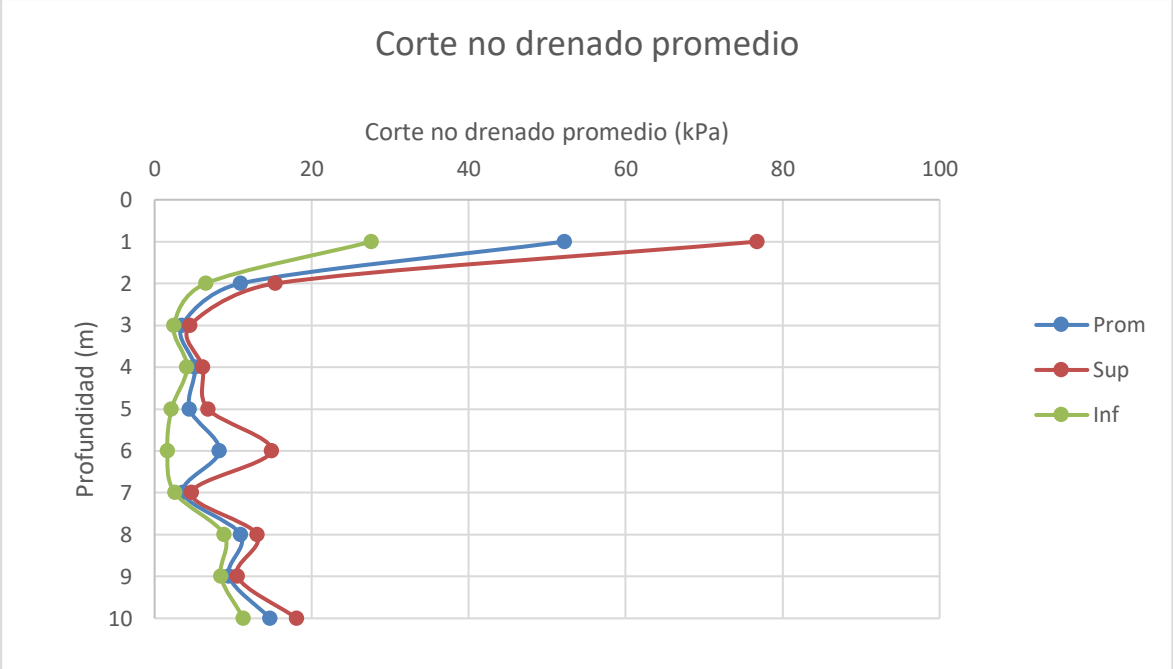


Figura 44: Corte no drenado promedio de los 4 pozos con su desviación estándar en relación a la profundidad.

Podemos observar que la mayor cantidad de datos oscilan entre 0 y 20 kPa, éstos se encuentran dentro del rango esperado en esta disertación, no obstante, existen ciertas observaciones y aclaraciones a realizar sobre los resultados presentados. Si bien los ensayos se realizaron de manera adecuada y respetando los lineamentos normados, la naturaleza del material fue un factor que dificulto la ejecución del ensayo y sus resultados.

Como se expuso previamente todas las muestras ensayadas se encontraban saturadas , por lo tanto, se esperaba que la envolvente de Mohr sea paralela al eje horizontal (material puramente cohesivo), sin embargo, en los gráficos analizados no se observó este comportamiento en ninguna de las probetas, exceptuando un par y si bien el alcance de esta disertación no cubre un estudio a detalle acerca del comportamiento de suelos orgánicos en triaxiales, se ha encontrado ciertas razones por las cuales se obtuvo estos resultados. En primer lugar (Head & Epps, 2014) menciona que a pesar de que una probeta orgánica se encuentre saturada, durante la compresión de ésta el reacomodo de las fibras provoca que exista un drenaje del gas contenido en la muestra o entre las paredes y la membrana, esto resulta en un cambio de volumen en la probeta y, al ser un efecto que no se puede controlar o cuantificar, causa que dos probetas del mismo material presenten diferentes resultados; cabe destacar que, en ciertos casos, de un mismo Shelby se obtuvo materiales de composición diferentes entre sí (figura 45), por esta razón, los resultados también pueden variar entre dos probetas de una misma muestra. De los resultados obtenidos también se evidenció que, en

una cantidad considerable, las probetas con menos confinamiento poseían diámetros mayores, en sus círculos de Mohr que las probetas con mayor confinamiento. De esta manera se puede mencionar que existe una relación entre el confinamiento y el comportamiento del material durante el ensayo. Sin embargo, este efecto no se presenta de manera general en todos las probetas y se sugiere complementar estudios enfocados a este tema. También, de acuerdo con el trabajo presentado por (Albuja J. D., 2016), además de mencionar la dificultad que supone realizar triaxiales en turbas y suelos orgánicos, se afirma que en triaxiales consolidados - no drenados las muestras si drenaban y las fibras reforzaban la muestra, debido a su reacomodo, incrementando su resistencia. Por esta razón ciertas probetas no presentaban un pico definido en sus curvas de esfuerzo - deformación a pesar de poseer deformaciones unitarias elevadas.

Tomando en cuenta los puntos mencionados, se optó por usar el menor valor de corte no drenado entre dos probetas y que este se encuentre en un rango adecuado en comparación con otros suelos orgánicos, de esta manera los datos tabulados serían los más conservadores a usarse en cualquier estudio.



Figura 45: Diferentes materiales hallados en un mismo tubo shelby que presentan diferentes consistencias.

3.1.12. Módulo de deformación restringido

Al igual que el corte no drenado, el módulo de deformación restringido del suelo es un parámetro importante en el análisis geotécnico, sobre todo para el cálculo del asentamiento elástico. De acuerdo con la mecánica de materiales podemos definir al módulo de deformación restringido como la relación, directamente proporcional, entre el esfuerzo y la deformación unitaria de un material en su zona de proporcionalidad para un esfuerzo de confinamiento determinado. A este comportamiento lineal se lo denomina Ley de Hooke y está presente en todos los materiales (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2010).

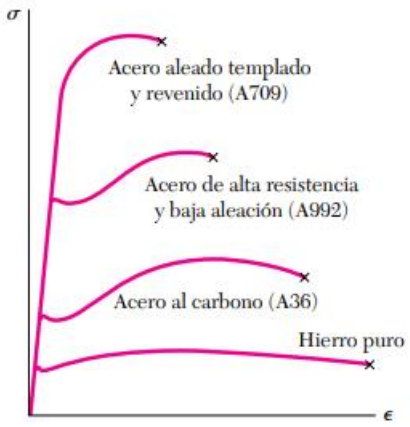


Figura 46: Curvas esfuerzo deformación para diferentes materiales (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2010).

El módulo de deformación restringido en suelos es uno de los parámetros más difíciles a determinar, diferentes autores afirman que el cálculo de estas se basa meramente en predicciones haciendo uso de teoría de materiales. Por esta razón, existen varios métodos para hallarlo: tangente inicial, secante, recarga, descarga y cíclico, cada uno de estos se basa en trazar una línea en la curva y calcular la pendiente de esta para hallar el módulo (Briaud, 2001). En esta disertación se utilizó el modelo tangente inicial ya que éste es usado comúnmente para representar el módulo del suelo no drenado debido a la respuesta elástica que se evidencia cerca origen de la curva, sin embargo, esto no quiere decir que sea el modelo óptimo al momento de determinar este parámetro (Akpila & Omunguye, 2014). A continuación, se presentan los resultados obtenidos.



Figura 47: Módulo de deformación restringido con relación a la profundidad.

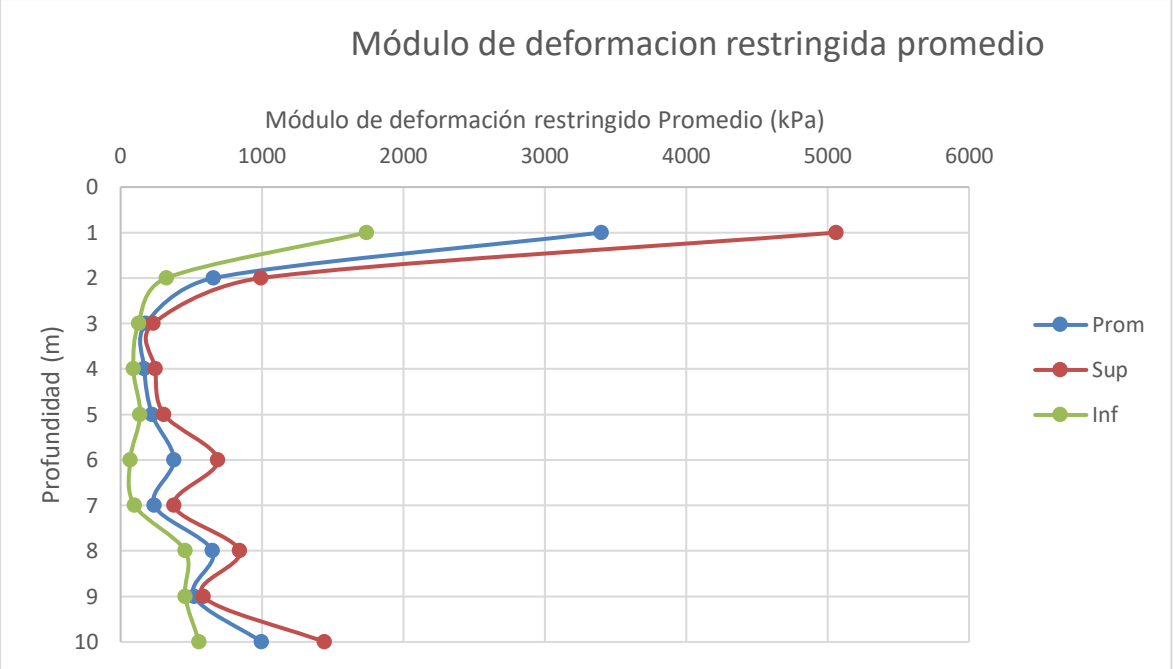


Figura 48: Módulo de deformación restringido promedio de los 4 pozos con su desviación estándar en relación a la profundidad.

Analizando la figura 48 podemos apreciar que los valores del módulo de deformación restringido oscilan entre 0 y 1000 kPa, los suelos muy blandos se caracterizan por tener módulos de elasticidad entre 2 y 15 MPa, por lo tanto, los suelos analizados son aún más blandos.

E from field values (MPa)	
Clay soil	Range
Very soft	2-15
Soft	15-25
Medium	25-50
Hard	50-100

Figura 49: Clasificación de la consistencia de suelos de acuerdo con su módulo de deformación restringido (Akpila & Omunguye, 2014).

De acuerdo con (Meyer & Olszewska, 2021) el valor del módulo de deformación restringido para suelos orgánicos es bajo. “Los suelos orgánicos presentan un comportamiento no lineal en su relación esfuerzo-deformación. Incluso para cargas pequeñas el material orgánico presenta grandes desplazamientos”. Por lo tanto, se optó por utilizar el menor valor de módulo de deformación restringido entre dos probetas, de esta manera el valor tomado será el más conservador.

CAPÍTULO IV

4. CORRELACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo aborda la obtención de correlaciones, lo cual concluye con el alcance propuesto para esta disertación. Haciendo uso de los índices del ensayo DMT y los parámetros geomecánicos obtenidos de los ensayos de laboratorio, se procedió a encontrar tres expresiones las cuales permitirán hallar valores de módulo de deformación restringido, corte no drenado y densidad en suelos orgánicos. También se comparó los valores encontrados entre estas expresiones y las propuestas por Marchetti, las cuales son utilizadas actualmente, para poder definir si estas convergen o difieren en sus resultados.

4.1.1. Módulo de deformación restringido

De acuerdo con (TC16 DMT Report, 2001) se menciona que el valor del módulo de deformación restringido no puede ser directamente igual al E_d debido a la falta de información sobre el esfuerzo que ha sufrido el suelo en su historia. Por esta razón, el módulo de deformación restringido es aproximadamente el 80% del módulo edométrico del dilatómetro o M_{DMT}.

Tangent Constrained Modulus of Soil Deformation
(see Test Method D2435)

$$M = R_M E_D \text{ (minimum } R_M = 0.85)$$

$$M = \begin{cases} R_M = 0.14 + 2.36\log K_D & \text{if } I_D < 0.6 \\ R_M = R_{M,0} + (2.50 - R_{M,0})\log K_D & \text{if } 0.6 < I_D < 3.0 \\ R_{M,0} = 0.14 + 0.15(I_D - 0.6) & \text{if } I_D \geq 3.0 \\ R_M = 0.50 + 2.00\log K_D & \text{if } K_D > 10 \\ R_M = 0.32 + 2.18\log K_D & \end{cases}$$

Figura 50: Fórmulas para encontrar el módulo edométrico (ASTM D6635-15, 2015).

Para encontrar la correlación correspondiente primero se contempló la relación entre el módulo de deformación restringido hallado en laboratorio y el valor módulo dilatométrico. Esto generó una nube de puntos la cual presenta una tendencia definida.

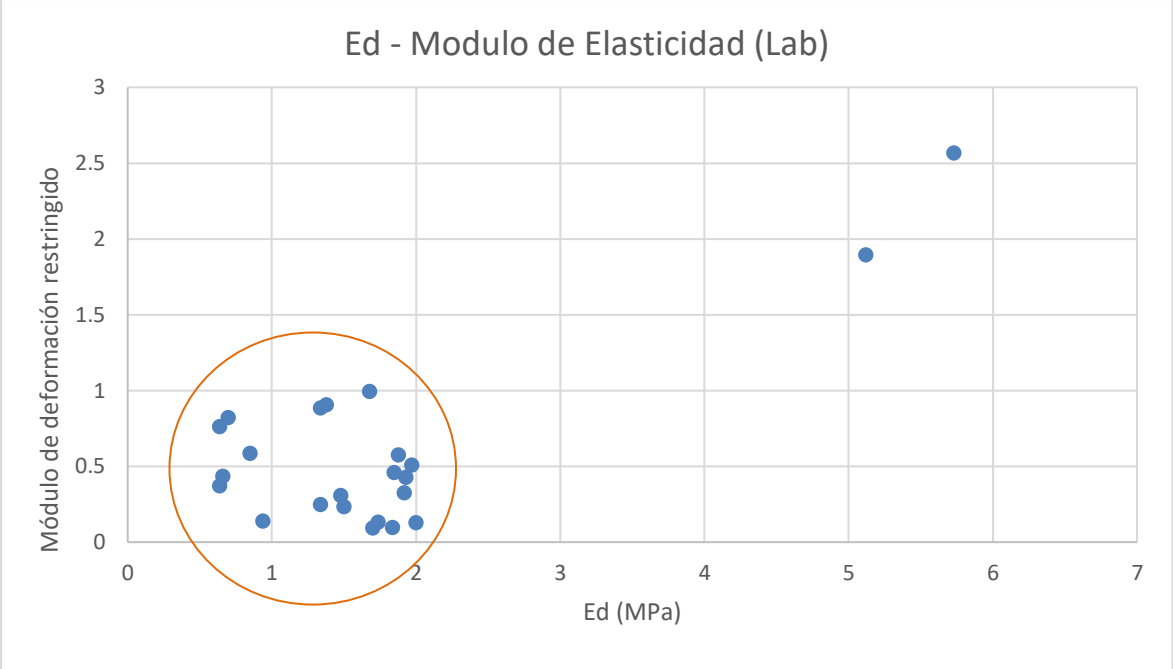


Figura 51: Relación entre el módulo de deformación restringido en campo y el valor de Ed.

Si se observa el sector marcado en la figura 51 la mayor relación de datos entre ambas variables se encuentra ubicada en valores bajos, los valores altos permitieron a la función poseer un carácter ascendente, lo cual ocurre en la realidad dado que el módulo de deformación restringido incrementa si el E_d lo hace.

Dado que el I_d es un parámetro que interviene en la caracterización del material, vale la pena comprender la relación que existe entre esta y el E_d.

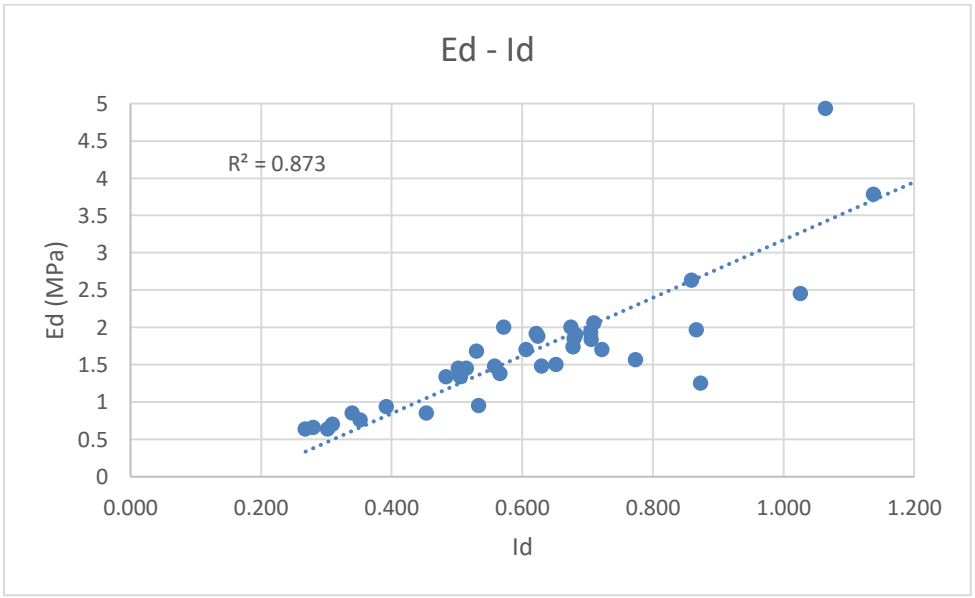


Figura 52: Relación entre el Id y el Kd.

Podemos afirmar que existe una tendencia definida entre ambos índices, a medida que aumenta el uno, el otro también. También se presenta la comparación entre los resultados obtenidos utilizando las ecuaciones actualmente vigentes basadas en los estudios de Marchetti (ver figura 48) y también los datos obtenidos en laboratorio.

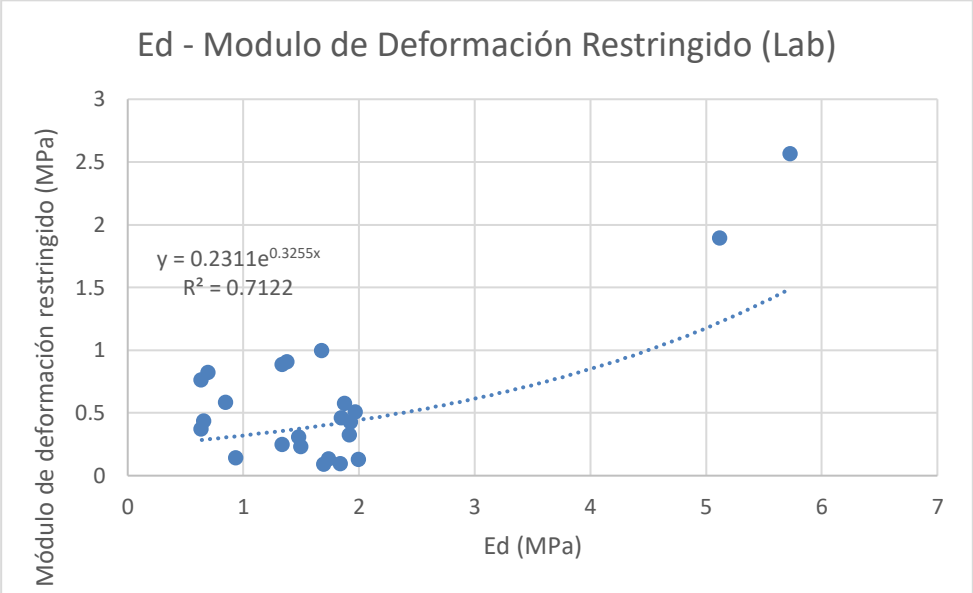


Figura 53: Correlación y ecuación de regresión para obtención del módulo de deformación restringido.

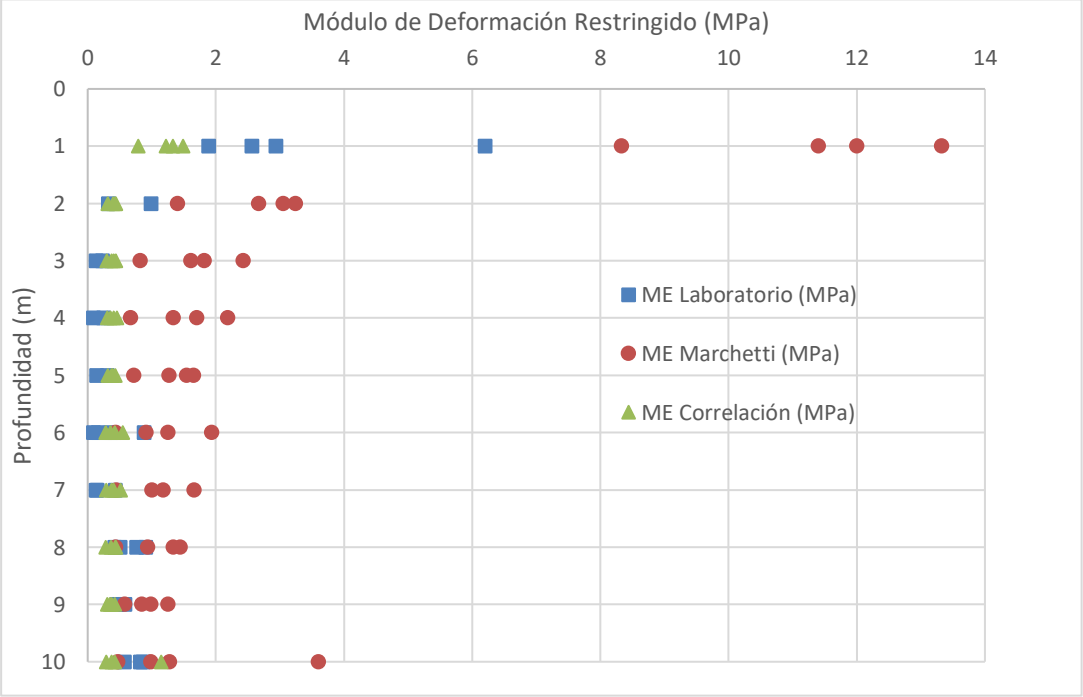


Figura 54: Comparación entre diferentes valores de módulo de deformación restringido.

$E = 0.231e^{0.326E_d}$ (MPa)	$I_d \leq 1$

Figura 55: Módulo de deformación restringido correlación.

Para realizar la estadística necesaria se utilizó Excel y se escogió la regresión que más se ajusta a los resultados esperados para este estudio los cuales están en el orden de 0.2 a 0.5 MPa. Se optó por un modelo exponencial que permite obtener valores coherentes de módulo de deformación restringido tomando en cuenta los datos reales. En el anexo 3 se puede revisar los datos obtenidos de manera más detallada, sin embargo, la figura 52 se muestran la variación entre los tres valores de módulo de deformación restringido. Los datos encontrados con los parámetros presentados por Marchetti presentan valores extremadamente altos tomando en cuenta los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio. La ecuación deducida en este trabajo, si bien provee resultados bajos para materiales más consistentes, presenta una tendencia con valores más acertados para suelos orgánicos con un I_d bajo.

4.1.2. Corte no drenado

Al igual que en el módulo de deformación restringido se parte del análisis hecho por Marchetti en su ecuación, esta relaciona el corte no drenado con el esfuerzo efectivo vertical y el K_d; como se mencionó en el capítulo 2 esta ecuación está delimitada para material con un Id menor a 1.2.

$c_u = 0.22\sigma'_{vo}(0.5K_d)^{1.25}$ (MPa)	$I_d < 1.2$

Figura 56: Ecuación propuesta por Marchetti para encontrar el corte no drenado.

De esta manera haciendo uso de las variables K_d (índice de esfuerzo horizontal) y el esfuerzo efectivo a una profundidad específica, se obtuvo la correlación entre ellas para obtener el corte no drenado.

Primero cabe aclarar que los datos encontrados se encontraban dispersos entre sí, sin embargo, se encontró una tendencia definida entre el segundo y el décimo metro de profundidad en los pozos de análisis. Se tomó la decisión de aislar estos datos puesto que provee valores de corte no drenado coherentes para este tipo de suelo y de interés para esta disertación,

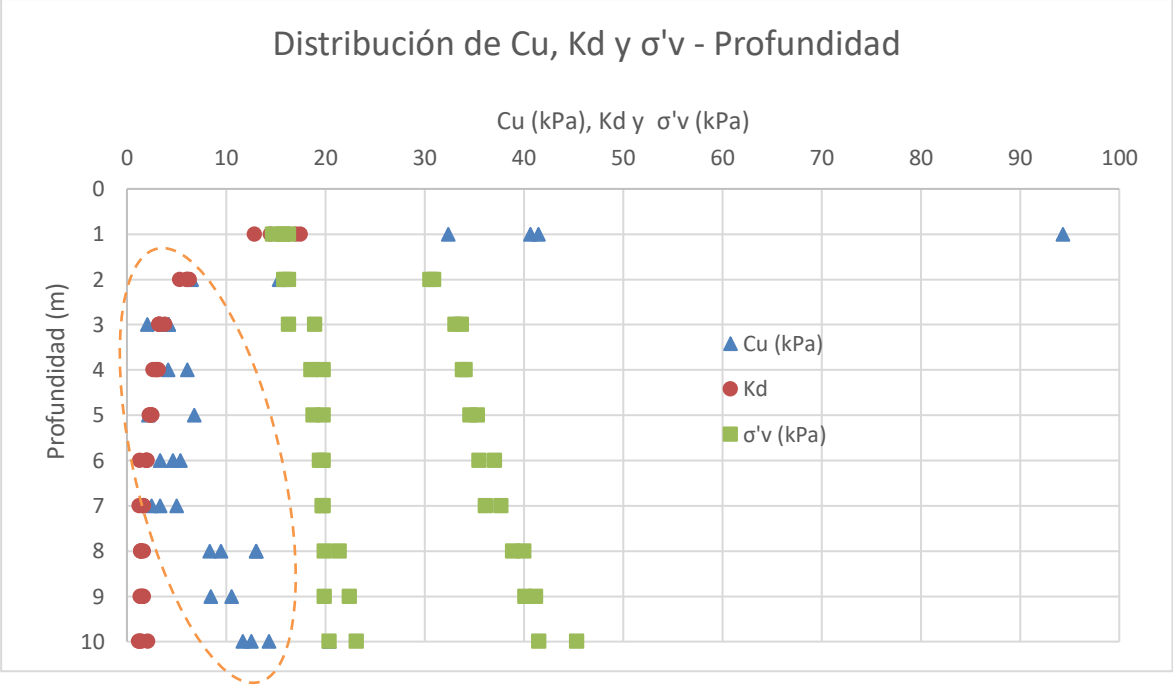


Figura 57: Distribución de el corte no drenado, Kd y el esfuerzo efectivo vertical con relación a la profundidad.

En la figura 57 podemos observar que, en la zona marcada entre el metro 2 y 10, el C_u y el K_d tienen valores que se aproximan entre ellos lo que permite suponer una relación fuerte, hasta comprobarlo con la estadística necesaria. Se debe considerar que el valor del C_u tiene una relación directamente proporcional con la profundidad, por lo tanto, la ecuación a obtener debe considerar este efecto. Mediante el uso del software Minitab, posterior al haber eliminado datos los cuales no resultaban de interés, se obtuvo tanto el coeficiente de correlación entre variables como la regresión que provee la ecuación para el cálculo del corte no drenado.

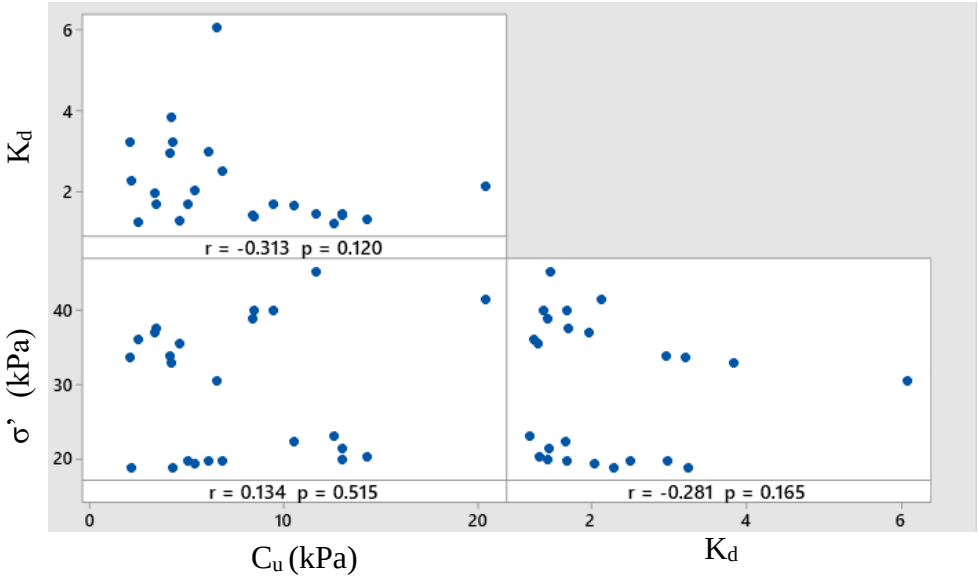


Figura 58: Relación entre variables (Cu, Kd y σ'v)

En la figura 58 podemos evidenciar la relación que tiene cada una de las variables entre sí. De acuerdo con (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014) podemos afirmar que existe un grado de relación medio negativo entre el K_d y el C_u y también entre el σ'_v y el K_d. Por otro lado, el valor de correlación entre σ'_v y el C_u indica que esta es una relación débil positiva. El valor negativo en la correlación únicamente indica que las variables se relacionan inversamente y el grado de relación indica el nivel de fuerza en la asociación entre estas. Tomando en cuenta lo dicho previamente se obtuvo una ecuación basándonos en la estructura propuesta por Marchetti (figura 56) y utilizando los datos entre el metro 2 y el metro 10, a continuación, se presenta la ecuación.

$c_u = 0.262\sigma'_{vo}K_d^{-0.221}$	$I_d \leq 1$

Figura 59: Ecuación de corte no drenado hallado por medio de la correlación de datos propios (metro 2 - 10)

Esta ecuación es útil para obtener el corte no drenado de suelos muy blandos, como son los suelos orgánicos analizados en esta disertación. Con la ecuación previa obtuvimos valores de corte no drenado que se acercan a los encontrados en laboratorio, sin embargo, difieren en cuanto a los obtenidos por medio de la ecuación de Marchetti.

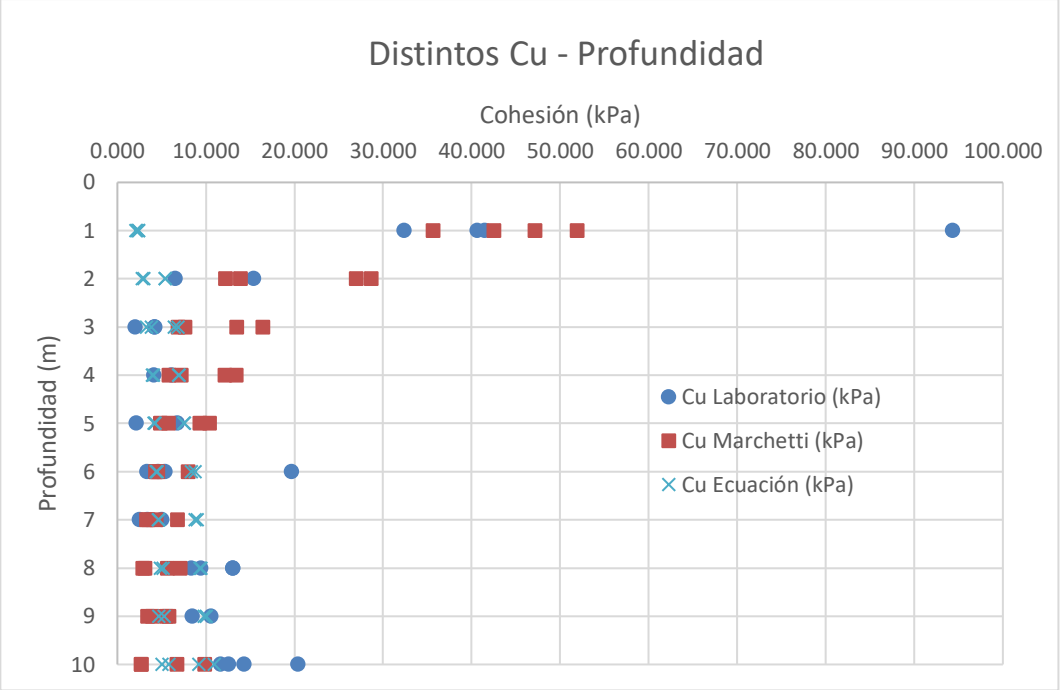


Figura 60: Comparación entre diferentes valores de corte no drenado.

Es notoria la tendencia asumida por los valores calculados con la ecuación obtenida, ésta mantiene a los valores de C_u en el orden de 2 a 10 kPa. Si bien esta ecuación es capaz de proveer valores aceptables para suelos blandos orgánicos del lugar de investigación, no es útil para suelos más consistentes. Si observamos los valores calculados para el primer metro de cada pozo, donde ya se ha mencionado que el material es consistente, estos no se acercan a los valores reales, los cuales son elevados en comparación. De esta manera podemos afirmar que la ecuación predice de mejor manera esta propiedad en suelos blandos. Por otro lado, la tendencia de Marchetti asume de mejor manera los valores de corte no drenado en el material de la superficie, pero, se aprecia que en ciertos depósitos de suelo orgánicos asume valores de corte no drenado elevados, lo que puede acarrear a una mala interpretación del material presente.

Como ejercicio se realizó una regresión utilizando el mismo software, los datos excluidos del primer análisis y la estructura de la ecuación de Marchetti. Lo interesante de este resultado es que el programa obtuvo una ecuación muy similar a la expuesta en la figura 56.

$$c_u = 0.0942\sigma'_{vo}K_d^{1.24}$$

Figura 61: Ecuación de corte no drenado hallado mediante la correlación de datos propios (todo el pozo).

Esta ecuación, al poseer una gama de datos que no sólo se enfoca al material de interés, provee datos muy similares a los obtenidos con la ecuación de Marchetti.

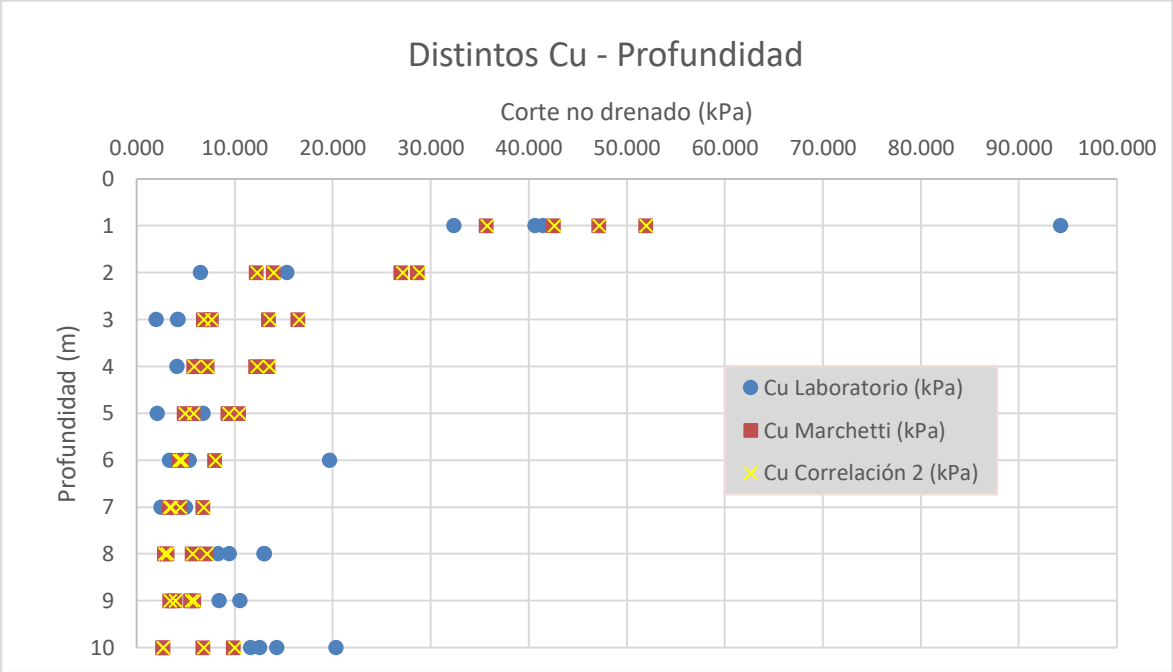


Figura 62: Comparación entre corte no drenado hallado por medio de la ecuación Marchetti y el corte no drenado hallado por medio de la ecuación en la figura 61.

La gráfica expone que los valores obtenidos de la correlación y los de Marchetti prácticamente se sobreponen. Esto afirma que el habernos enfocado en el material más vulnerable provee datos más ajustados para los materiales blandos orgánicos.

4.1.3. Densidad

Si bien Marchetti no cuenta con una ecuación definida para obtener la densidad de los suelos existe una gráfica que relaciona el E_d y el I_d y provee la relación entre la densidad del suelo y la densidad el agua (γ_s/γ_w). El nomograma presentado en la figura 11 establece que materiales cuyo valor de E_d sea menor a 12 bares (1.2 MPa) es material orgánico e independientemente del valor que tome I_d, la relación γ_s/γ_w será de 1.5. Asumiendo la densidad del agua como 1 g/cm^3 afirma que todo material blando orgánico posee una densidad de 1.5 g/cm^3 o menos, de acuerdo con el nomograma, sin embargo, este no es el caso.

En la figura 36 se observa que los valores de densidad oscilan entre 1 y 1.30 g/cm^3 en nuestro material de interés. Además, los datos de E_d del suelo no reflejan el valor de densidad

que proveería la gráfica de Marchetti. Tomando en cuenta todos los parámetros previamente mencionados se optó por correlacionar los valores de densidad del con el I_d del mismo, obteniendo así los siguientes resultados.

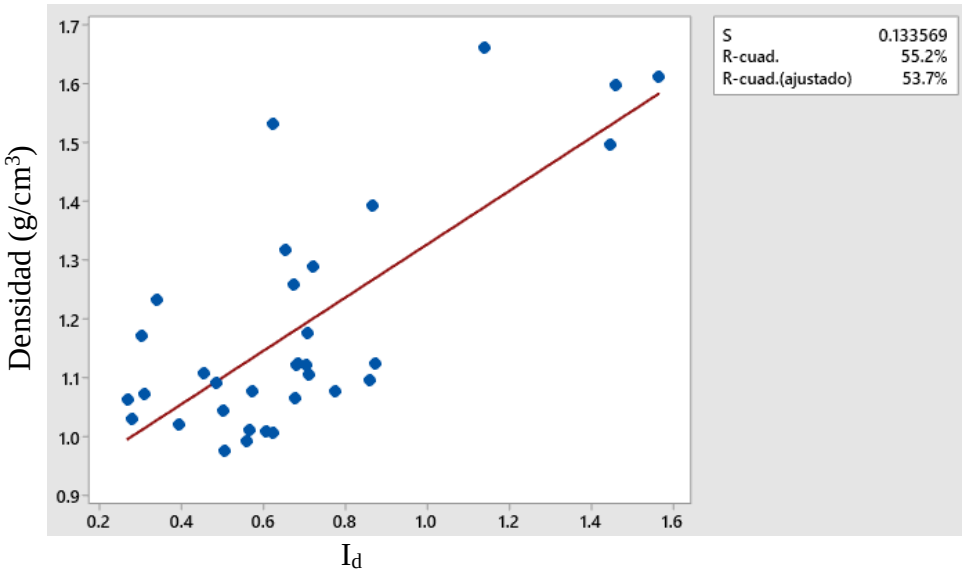


Figura 63: Correlación y regresión entre la densidad y el valor Id.

$\rho = 0.874 + 0.453 I_d$ (g/cm^3)	$I_d \leq 1$

Figura 64: Ecuación de densidad hallada mediante la correlación de datos propios.

La regresión expuesta en la figura 64 se realizó utilizando Minitab y presenta un R^2 de 0.552 lo cual se traduce a que la asociación tiene un grado de relación fuerte (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). La relación lineal presenta el incremento de la densidad según aumenta el valor de I_d y podemos observar que la mayor cantidad de datos se agrupan en los valores esperados tanto de densidad como de I_d. Vale la pena mencionar que la ecuación expuesta tiene mayor efectividad para materiales con un Id menor a 1. Al igual que con los otros dos parámetros se comparó la densidad obtenida en campo, la densidad obtenida con el nomograma de Marchetti y la densidad obtenida con la ecuación encontrada; dado que el nomograma de Marchetti provee el dato γ_s/γ_w, la densidad de agua fue asumida como 1 g/cm^3.

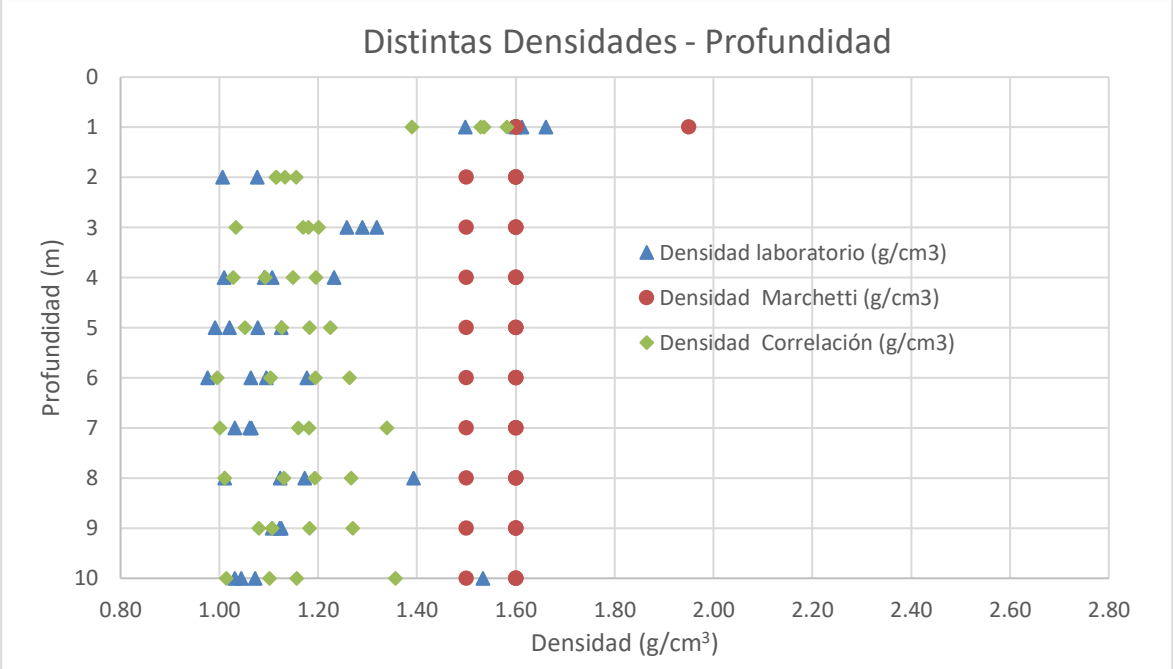


Figura 65: Comparación entre densidad hallada por medio de nomograma de Marchetti, la densidad hallada por medio de la ecuación en la figura 62 y la densidad hallada en laboratorio.

Es evidente la diferencia de los datos obtenidos, la ecuación hallada presenta datos en función del I_d lo cual acerca mucho a los valores reales de densidad. Utilizando el método de Marchetti se obtienen datos no acordes al material y que poco aporta dentro de la caracterización del suelo estudiado.

CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1. Discusión y conclusiones

En esta disertación se obtuvo expresiones que permiten hallar parámetros geomecánicos de corte no drenado, módulo de deformación restringido y densidad para suelos blandos orgánicos. A continuación, se presenta un resumen de las expresiones deducidas para proceder con la discusión y conclusión de resultados.

$c_u = 0.262\sigma'_{vo}{K_d}^{-0.221}$(MPa)	$I_d \leq 1$
$E = 0.231e^{0.326E_d}$ (MPa)	$I_d \leq 1$
$\rho = 0.874 + 0.453I_d$ (g/cm^3)	$I_d \leq 1$

Después de haber revisado los resultados conjuntos, entre las correlaciones deducidas en este trabajo y las presentadas por Marchetti, es posible afirmar que existe una diferencia entre ambos. En primer lugar, es claro que las expresiones deducidas proveen valores más conservadores y, considerando la naturaleza del material analizado, aporta confianza en cuanto a su uso en proyectos ingenieriles. De acuerdo con (Mlynarek, Tschuschke, & Wierzbicki, 2006) las expresiones de Marchetti estiman estos parámetros de manera muy buena en suelos inorgánicos, sin embargo, los suelos orgánicos y turbas necesitan un estudio particular dada su composición errática.

La clasificación de suelos realizada permite entender que el material predominante en el sector de análisis es mayormente orgánico y cualquier proyecto constructivo debe tomar en cuenta este hecho y proceder con la cautela necesaria. En Ecuador el ensayo de caracterización en campo más común es el SPT (Standard Penetration Test) (Albuja J. , 2021) Sin embargo, en suelos blandos es impreciso utilizar este procedimiento ya que obtener que únicamente con el peso del martillo éste se hundiría. La investigación realizada por (Das & Nandi, 2022) expone cómo el ensayo DMT es la solución óptima en suelos problemáticos y afirma que este provee correlaciones que se aproximan de mejor manera a la situación natural de suelos blandos. De esta manera se concluye que el estudio de suelos orgánicos debe ir estrechamente relacionado con el DMT puesto que este permite obtener resultados acordes a su condición *in situ*.

Hablando de resultados individuales, es pertinente compararlos no solo con los valores obtenidos, sino también con estudios similares realizados en otras locaciones con suelos orgánicos. El parámetro más discutido en este tipo de investigaciones es el corte no drenado. En los resultados obtenidos de laboratorio podemos evidenciar que éste toma valores entre 0 y 15 kPa, siendo la zona más crítica entre el metro 2 y 7 (C_u menor a 10 kPa) de cada pozo ya que este valor aumenta con la profundidad. La ecuación obtenida en esta disertación evidencia un comportamiento similar en dicha sección dado que se obtiene valores conservadores sin sobrestimarlos, todo lo contrario, a los valores provistos por la ecuación de Marchetti los cuales son altos en comparación. Esto podría acarrear a una mala interpretación de las condiciones del terreno y, por consecuencia, una mala toma de decisiones en la gestión de cualquier proyecto. (Lechowicz, Fukue, Rabarijoely, & Sulewska, 2018) mencionan que la ecuación original de Marchetti tuvo que ser modificada para tomar en cuenta el carácter orgánico del material, por lo tanto, partiendo de este hecho reafirmamos que el trabajo de Marchetti provee resultados mejores en suelos minerales. Sin embargo, lo antes mencionado no quiere decir que las relaciones de Marchetti no puedan predecir el comportamiento de un suelo blando de mejor manera que otros ensayos. Un ejemplo se presenta en la misma investigación de Das (2022) donde, de igual manera, se comparó el corte no drenado obtenido de ensayos triaxiales con el corte no drenado obtenido mediante la correlación del ensayo CPT y DMT. Si bien no existía mucha información proveniente de los triaxiales, se concluyó que los valores de C_u provistos por el ensayo DMT eran los que más se acercaban a la condición natural del material, en comparación con el ensayo CPT, y no solo relacionados con el corte no drenado sino también con el módulo edométrico de las muestras.

Esta disertación no contempla la obtención del módulo edométrico, sin embargo, para hallar el módulo de deformación restringido utilizando las relaciones de Marchetti se debe hallar este parámetro; previamente se mencionó que el módulo de deformación restringido es aproximadamente el 80% de este valor. Dado que Marchetti no posee una relación que permita hallar el módulo de deformación restringido del suelo, es difícil hacer una comparación con otras investigaciones, pero es posible analizar los resultados de módulo de deformación restringido obtenidos en esta disertación tanto en campo como con los valores obtenidos mediante la expresión propuesta. Al igual que con el corte no drenado, el módulo de deformación restringido obtenido mediante la relación planteada provee valores más cercanos a los obtenidos en laboratorio, estimando así de mejor manera esta característica en suelos orgánicos. De igual manera Mlynarek, et al. (2006) afirma que existe una ligera

sobrestimación del módulo edómetrico utilizando las correlaciones de Marchetti. Dada la estrecha relación entre estos dos parámetros y lo complejos que son los suelos orgánicos vale la pena realizar estudios particulares en este tipo de material.

En las conclusiones presentadas por (Konkol, et al, 2019) en su investigación sobre caracterización de suelos orgánicos, además de corroborar que las expresiones de Marchetti sobrestiman el valor de corte no drenado en suelos orgánicos, también nos presentan como el nomograma de Marchetti provee una mala clasificación de suelos orgánicos además de que no permite hallar valores adecuados de densidad. Esto se puede comprobar observando la comparación de los valores de densidad hallados tanto por laboratorio, DMT y la expresión hallada en esta disertación. Si bien la densidad *in situ* no posee una tendencia definida dada la composición del material, el nomograma provee datos que no reflejan las condiciones del material en su estado natural. La ecuación propuesta también tiene una tendencia errática, dado que depende del I_d del material, sin embargo, permite obtener datos más acordes a la naturaleza de las muestras. La densidad en suelos orgánicos de este tipo oscila entre 1 y 1.60 g/cm^3, es importante tener en cuenta que estamos hablando de valores de densidad bajos (Rabarijoely, 2018, Lechowicz, et al, 2018).

Recapitulando, las ecuaciones obtenidas en la presente disertación complementan el trabajo propuesto por Marchetti, se encarga de proveer la caracterización adecuada a suelos blandos orgánicos ecuatorianos semejantes a los hallados en este trabajo. La importancia de obtener parámetros certeros para este tipo de suelo recae en el hecho de que por sus pobres propiedades mecánicas dificulta mucho su uso en proyectos constructivos. Se debe considerar alternativas o soluciones que permitan al suelo aumentar su capacidad portante o evitar asentamientos excesivos. El ingeniero encargado es aquel que debe contemplar todas las soluciones y escoger la que mejor se ajuste, y gracias a estas expresiones cualquier profesional va a poseer una noción de las propiedades presentes en este tipo de material.

5.1.2. Recomendaciones

Es necesario profundizar en el estudio del comportamiento de muestras orgánicas en el ensayo triaxial. Dada su composición es necesario comprender que sucede cuando este tipo de material es sometido a esfuerzos de confinamiento y compresión. De esta manera se puede comprender el porqué de ciertos resultados, tanto de los círculos de Mohr como en las curvas de esfuerzo-deformación.

Sería adecuado realizar más ensayos DMT en otras locaciones ecuatorianas que

posean suelos orgánicos y utilizar las expresiones obtenidas para analizar su comportamiento y tendencia. De esta manera ver la posibilidad de utilizarlas en otras locaciones fuera del país.

Se recomienda comparar los resultados obtenidos con correlaciones de otros ensayos de campo como el CPT o la veleta de campo (FVT) para corte no drenado. Así se comprobaría que tan certeros son los datos obtenidos con las expresiones deducidas es esta disertación en relación con otras metodologías.

Gracias a que las ecuaciones planteadas en este trabajo proveen un margen que describe las propiedades de suelos orgánicos de manera eficaz, no es recomendable su uso en diseño. Este tipo de material posee pobres características mecánicas por lo que se recomienda contemplar otras alternativas al momento de utilizar un terreno que presente suelo similar para un proyecto constructivo. Sin embargo, dada la naturaleza del material analizado no se debe descartar la posibilidad de usarlo para actividades agrícolas.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Akpila, S., & Omunguye, I. (2014). SOIL MODULUS AND UNDRAINED COHESION OF CLAYEY SOILS FROM STRESS-STRAIN MODELS. *CANADIAN JOURNAL OF PURE AND APPLIED SCIENCES*.
2. Albuja, J. (2021). Determination of the undrained shear strength of organic soils using the cone penetration test and Marchetti's flat dilatometer test. INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING.
3. Albuja, J. D. (2016). Mechanical Properties of Peats . London: Imperial College .
4. Andino, F., & Bedón, D. (2017). EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE VIVIENDAS CONSTRUIDAS SOBRE SUELOS COLAPSABLES (TURBAS) EN UN ÁREA DE 13,23 HA EN EL SECTOR DEL GARROCHAL UBICADO EN EL SUR DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, Tesis de Grado.
5. ASTM D1140. (2022). Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75-µm (No.200) Sieve in Soils by Washing. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
6. ASTM D2487. (2022). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
7. ASTM D2850. (2022). Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial

Compression Test on Cohesive Soils. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org

8. ASTM D2974. (2022). Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, andOrganic Material of Peat and Other Organic Soils. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
9. ASTM D4318. (2022). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
10. ASTM D4427. (2022). Standard Classification of Peat Samples by Laboratory Testing. *ASTM International*. Weat Coshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
11. ASTM D653. (2022). Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
12. ASTM D6635-15. (2015). Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
13. ASTM D7263. (2022). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens. *ASTM International*. West Conshohocken, PA. Obtenido de www.astm.org
14. Beer, F. P., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales.* McGraw Hill.
15. Briaud, J.-L. (2001). *Introduction to Soil Moduli.* Geotechnical News.
16. Das, B. (2001). *Fundamentos de lngeniería Geotécnica.* Sacramento: Thomson.
17. Das, K., & Nandi, S. (02 de agosto de 2022). *Dilatometer—an in Situ Soil Exploration Tool for Problematic Ground Conditions vis-a`-vis for Economizing Construction Activities.* Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/362830821
18. Day, R. (2006). *Foundation Engineering Handbook.* McGraw Hill Construction.
19. Head, K. H., & Epps, R. J. (2014). *Manual of Soil Laboratory Testing* (Vol. Volume 3: Effective Stress Tests). Dunbeath Mill: Whittles Publishing.
20. Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación.* México D.F.: McGraw-Hill.
21. INEN 685. (1982). GEOTECNIA. MECANICA DE SUELOS. TERMINOLOGÍA Y SIMBOLOGÍA. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Quito, Ecuador. Obtenido de inen.gob.ec

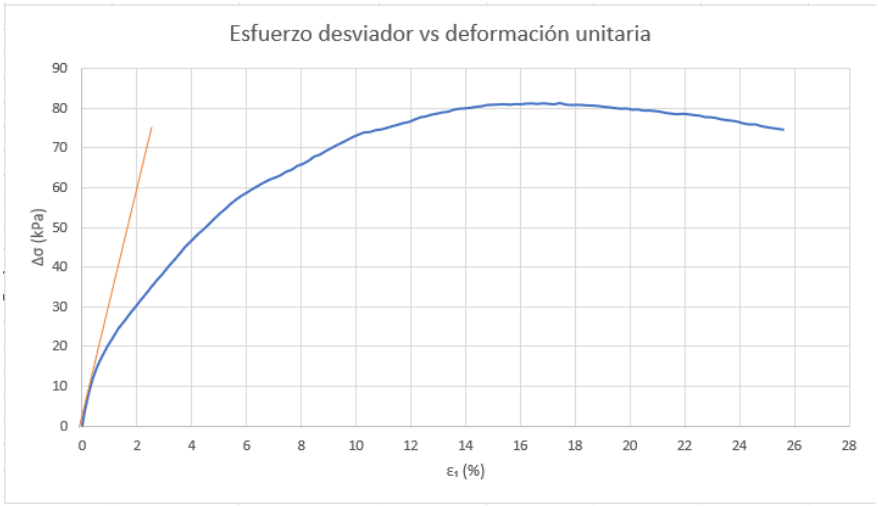
22. Konkol, J., Międlarz, K., & Bałachowski, L. (2019). Geotechnical characterization of soft soil deposits in Northern Poland. *ELSEVIER*.
23. Lechowicz, Z., Fukue, M., Rabarijoely, S., & Sulewska, M. J. (2018). Evaluation of the Undrained Shear Strength of Organic Soils from a Dilatometer Test Using Artificial Neural Networks. *MDPI*.
24. Li, W., O'Kelly, B., Yang, M., Fang, K., Li, X., & Li, H. (2020). Specific gravity of solids relationship with ignition loss for peaty soils. *ice Publishing*, 134-145.
25. Marchetti, S. (1980). IN SITU TESTS BY FLAT DILATOMETER. *JOURNAL OF THE GEOTECHNICAL ENGINEERING DIVISION* .
26. Marchetti, S., & Monaco, P. (21 de Mayo de 2001). SHORT COURSE on FLAT DILATOMETER (DMT). Bali: University of L'Aquila, Italy .
27. Meyer, Z., & Olszewska, M. (2021). Methods Development for the Constrained Elastic Modulus Investigation of Organic Material in Natural Soil Conditions. *MDPI*.
28. Meyer, Z., & Olszewska, M. (2021). Methods Development for the Constrained Elastic Modulus Investigation of Organic Material in Natural Soil Conditions. *MDPI*.
29. Mlynarek, Z., Tschuschke, W., & Wierzbicki, J. (2006). PROCEEDINGS FROM THE SECOND INTERNATIONAL FLAT DILATOMETER CONFERENCE. *The assessment of variability of CPTU and DMT parameters in organic soils*, (págs. 380-395). Poznán.
30. Municipio de Quito. (2016). *DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE AMENAZAS, VULNERABILIDADES Y RIESGOS* . Quito-Turubamba.
31. Rabarijoely, S. (2018). A New Approach to the Determination of Mineral and Organic Soil Types Based on Dilatometer Tests (DMT). *MDPI*.
32. Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades ens suelos de la zona cafetera colombiana.* Bogotá: Cenicafé.
33. Skempton, A. W., & Petley, D. J. (1970). *IGNITION LOSS AND OTHER PROPERTIES OF PEATS AND CLAYS FROM AVONMOUTH, KING'S LYNNAND CRANBERRY MOSS* . Geotechnique.
34. TC16 DMT Report. (2001). The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations. 41. Washington D.C.

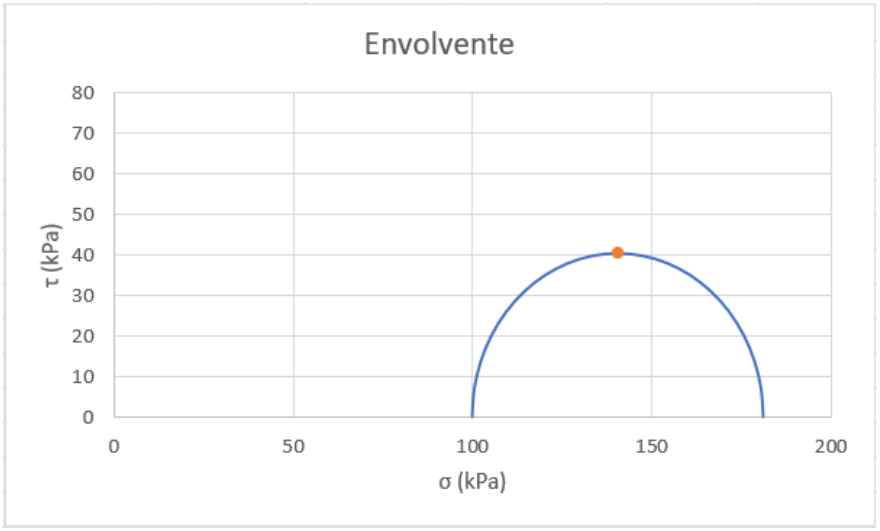
7. ANEXOS

ANEXO 1. GRÁFICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN Y CÍRCULOS DE MOHR OBTENIDAS DEL ENSAYO TRIAXIAL UU.

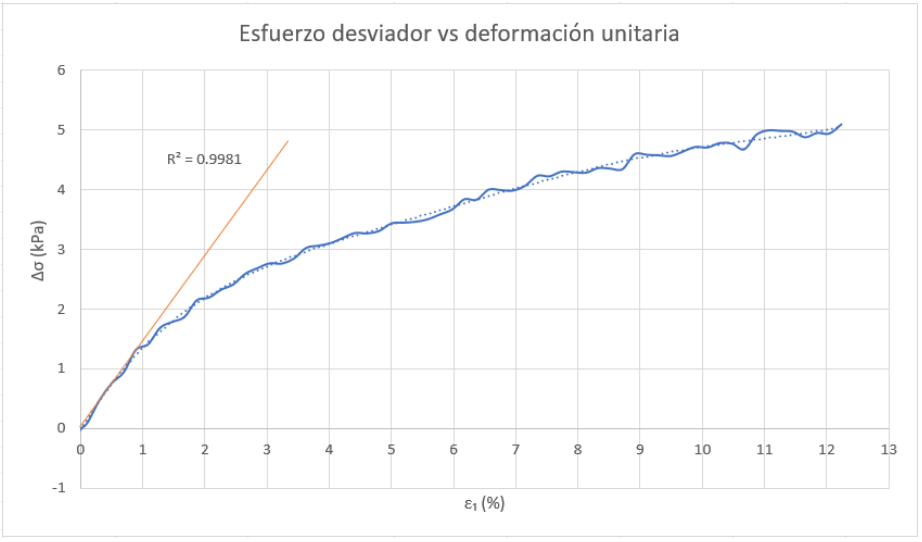
P01

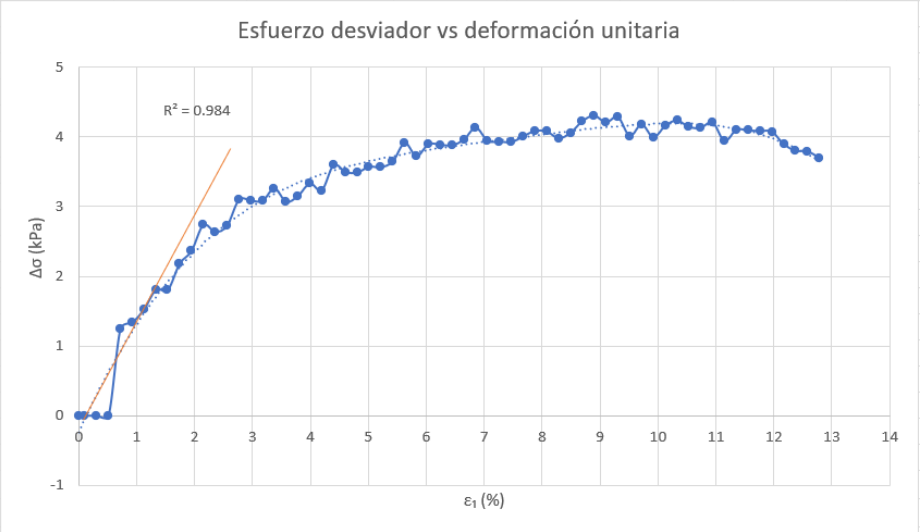
Prof. 0-1

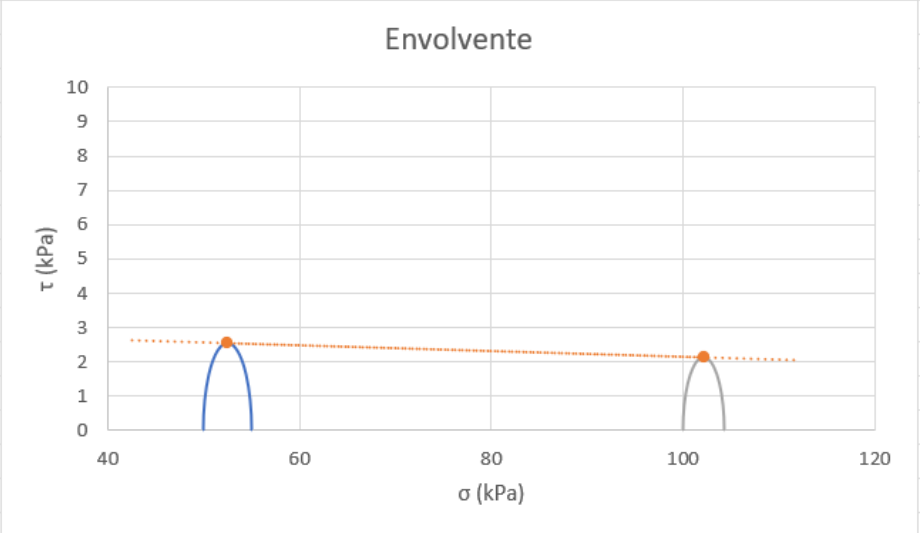



Envolvente
80
70
60
50
40
30
20
10
0
τ (kPa)
0
50
100
150
200
σ (kPa)

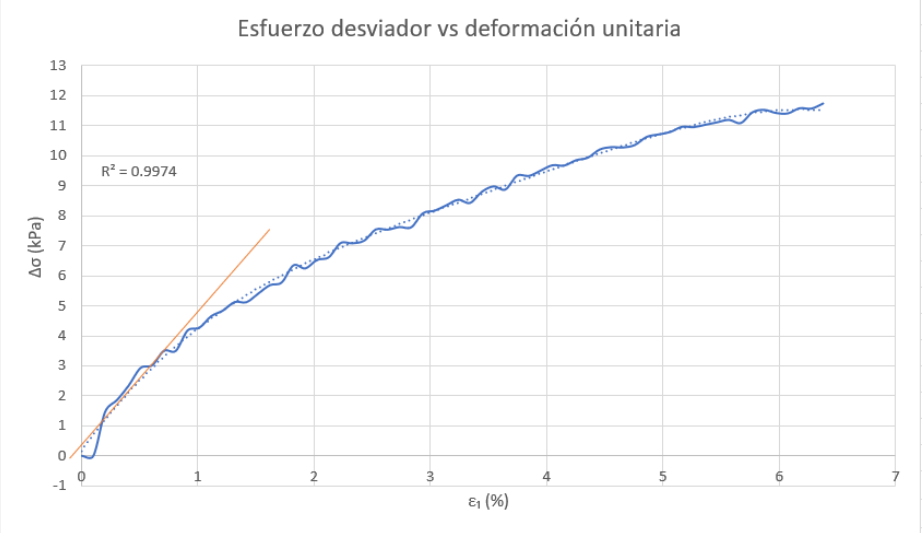
Prof. 4-5

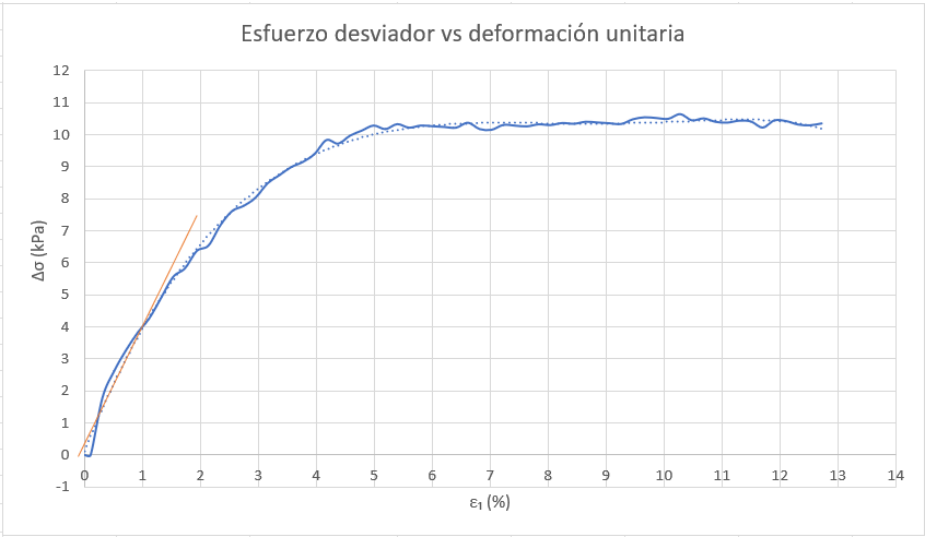

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9981
6
5
4
3
2
1
0
-1
Δσ (kPa)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
ε1 (%)

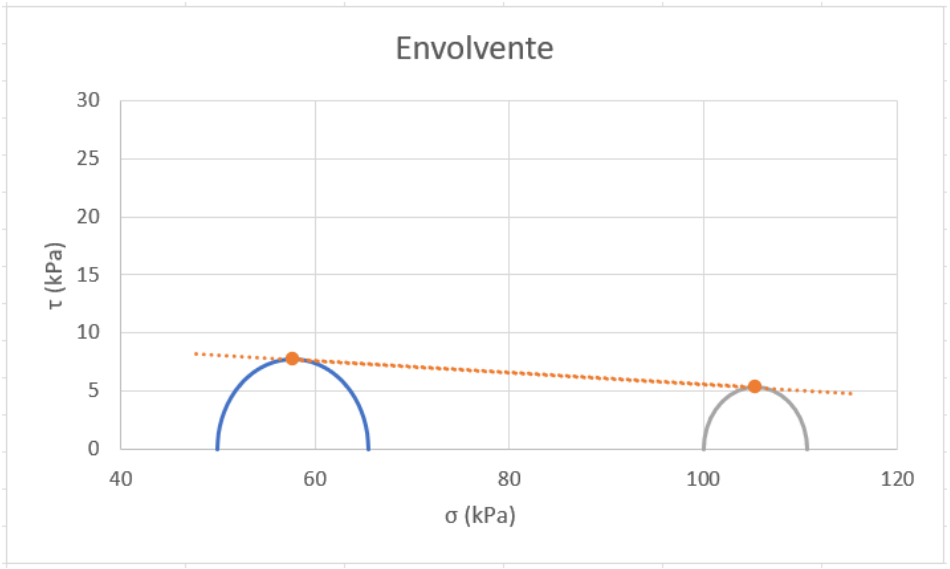

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.984
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

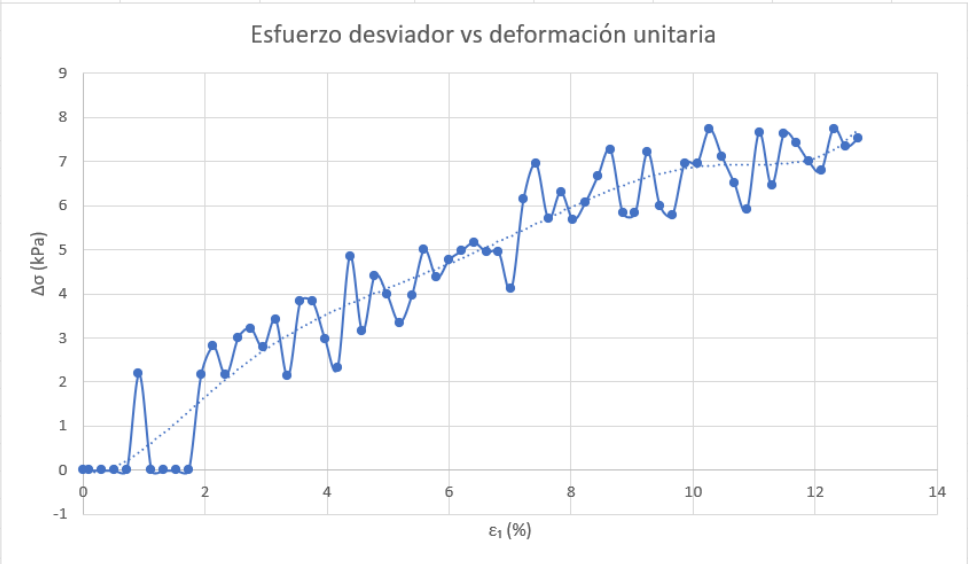
Prof. 5-6

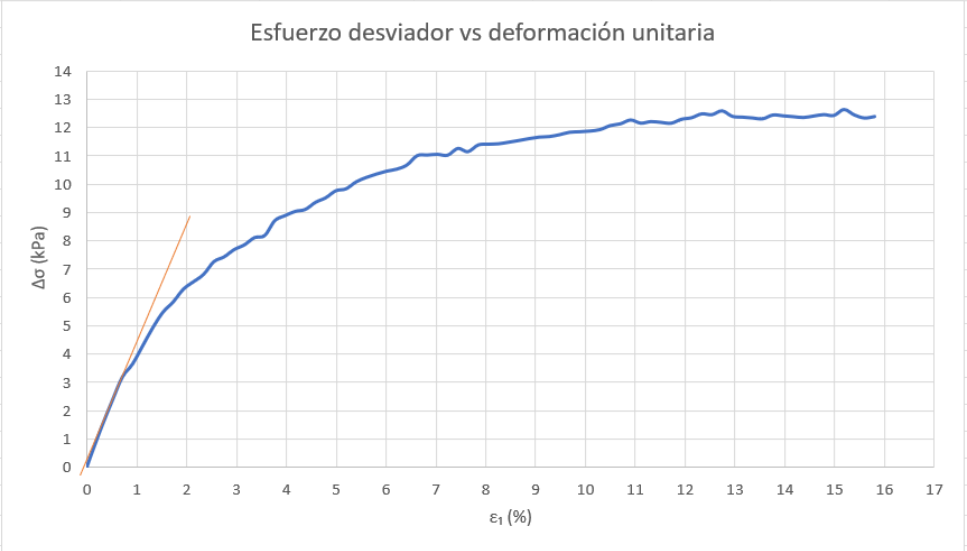

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9974
Δσ (kPa)
ε1 (%)

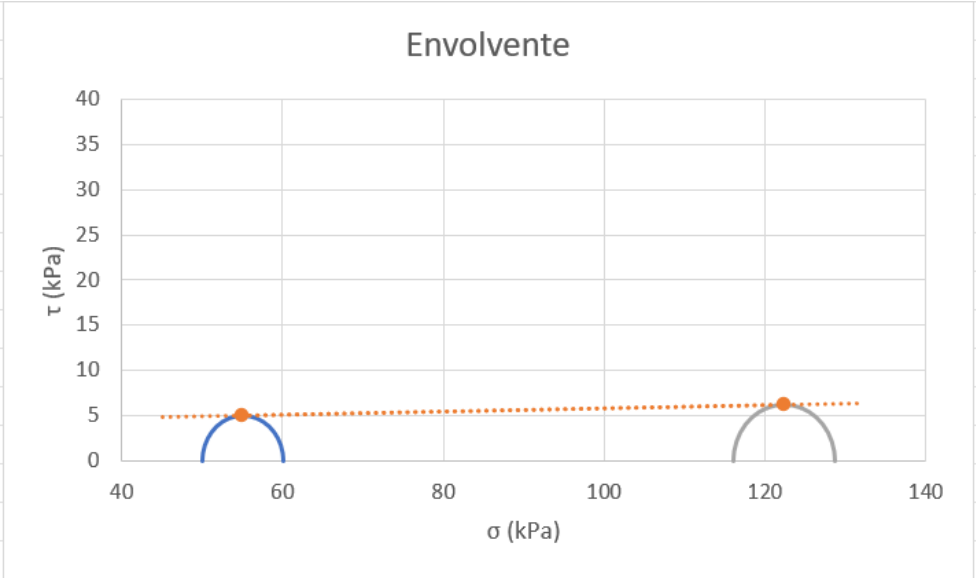

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

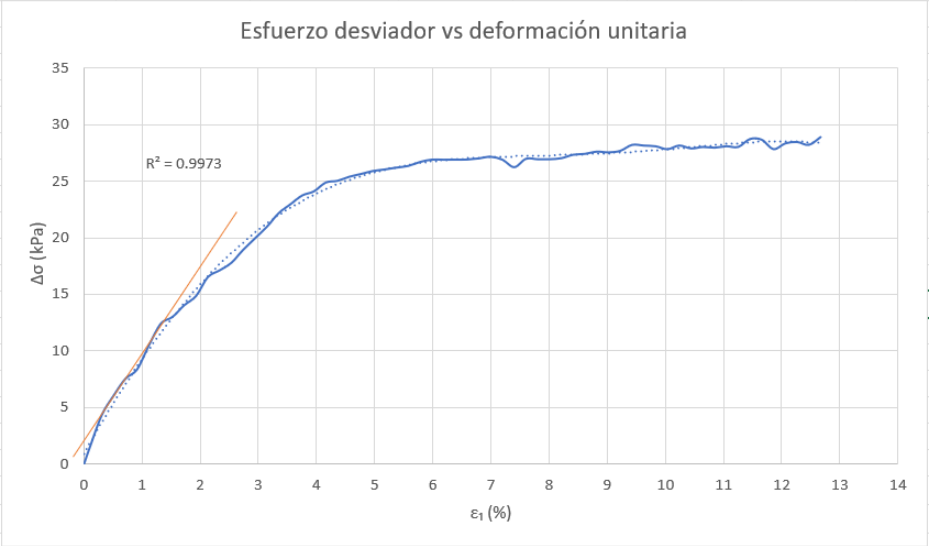
Prof. 6-7

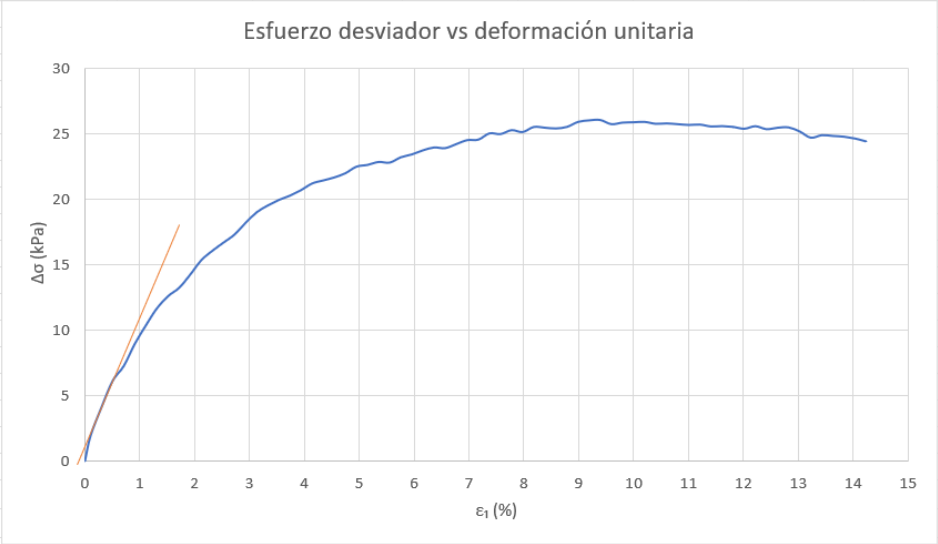

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)

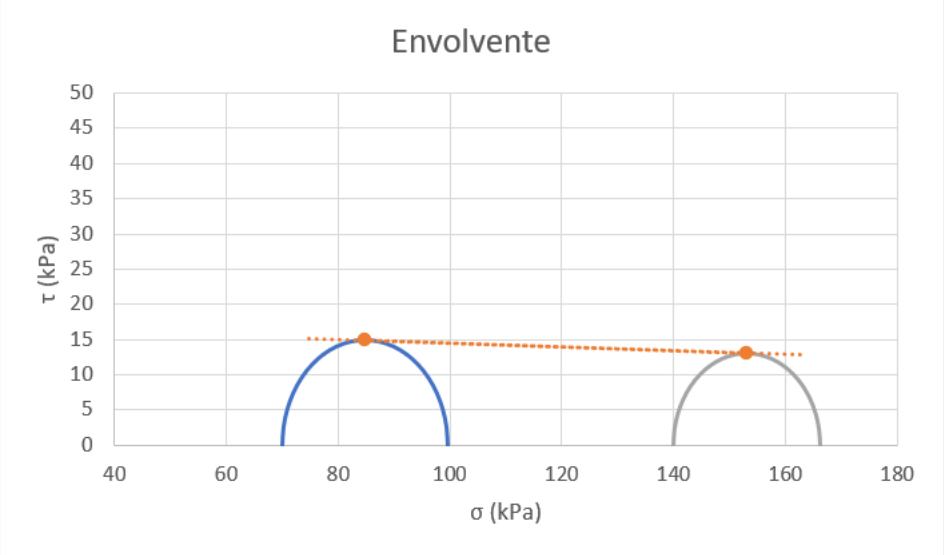

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

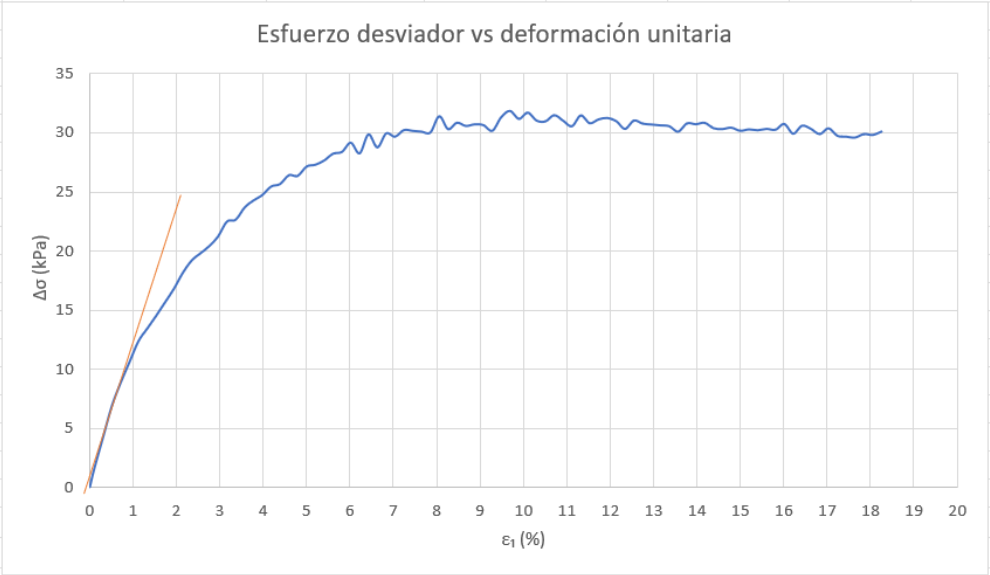
Prof. 7-8

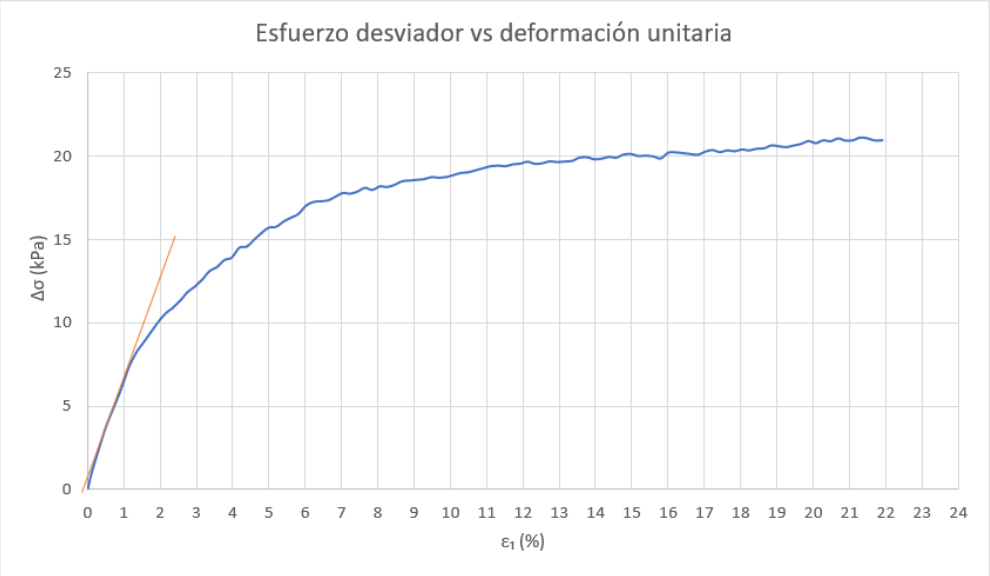

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9973
Δσ (kPa)
ε₁ (%)

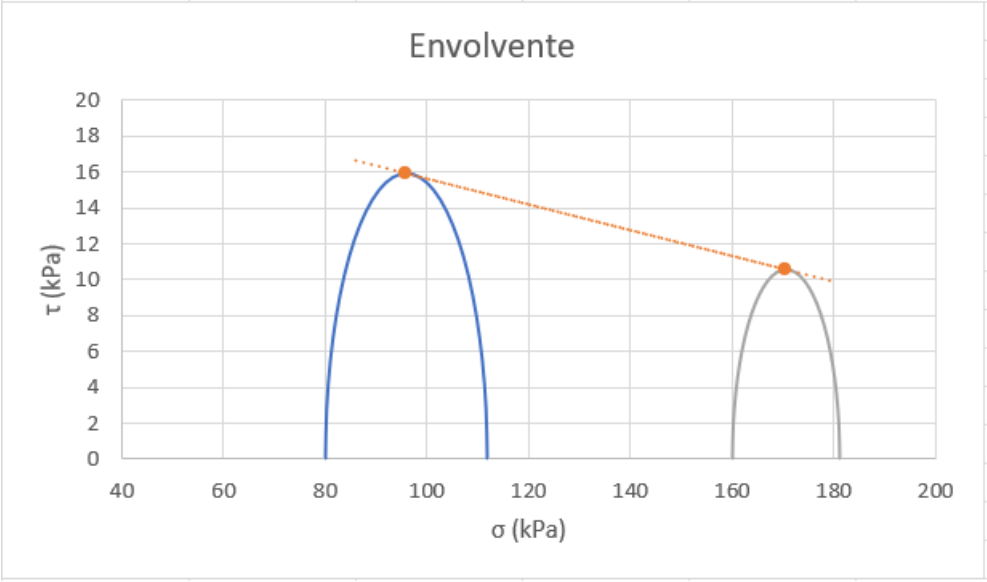

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε₁ (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

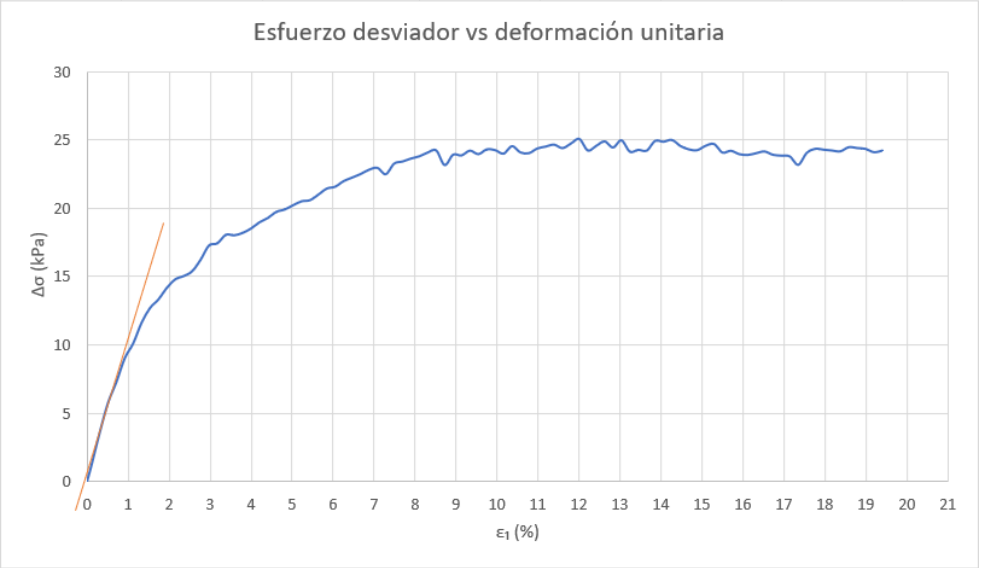
Prof. 8-9

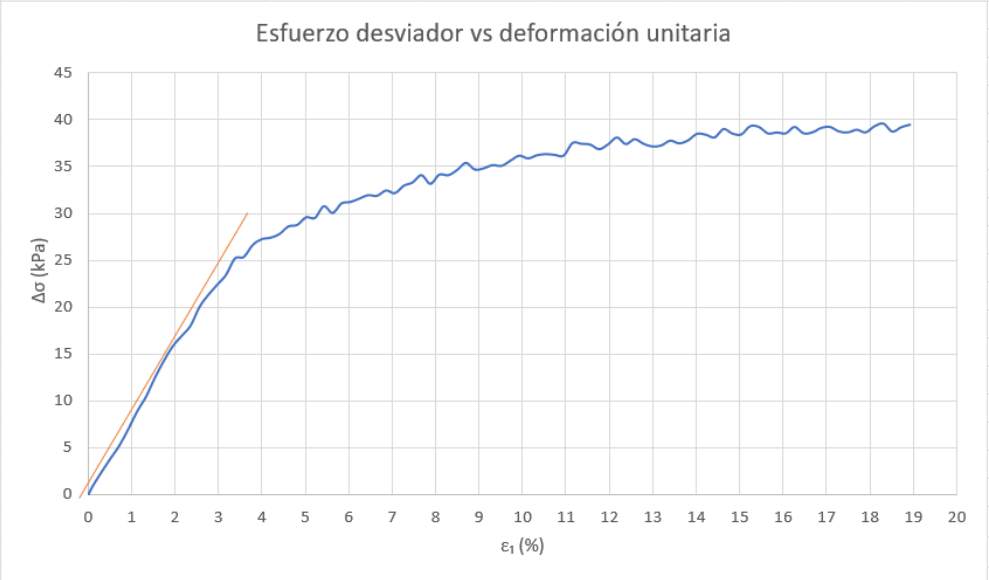

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)

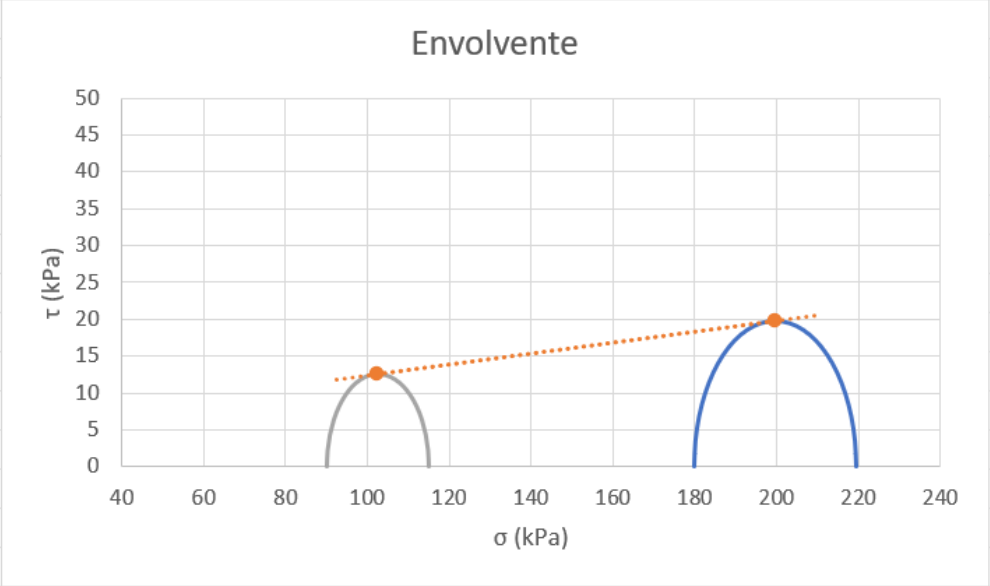

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

Prof. 9-10

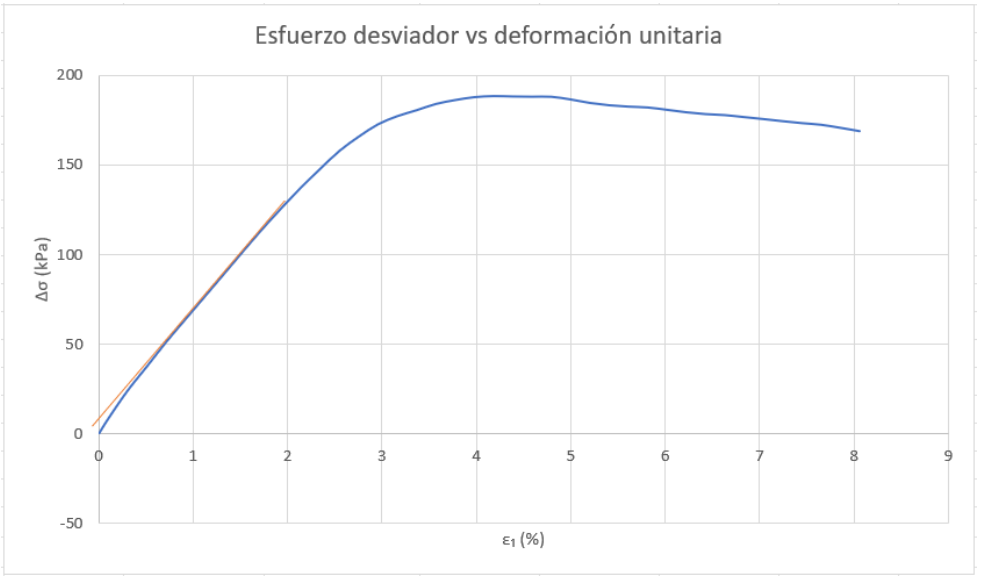

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

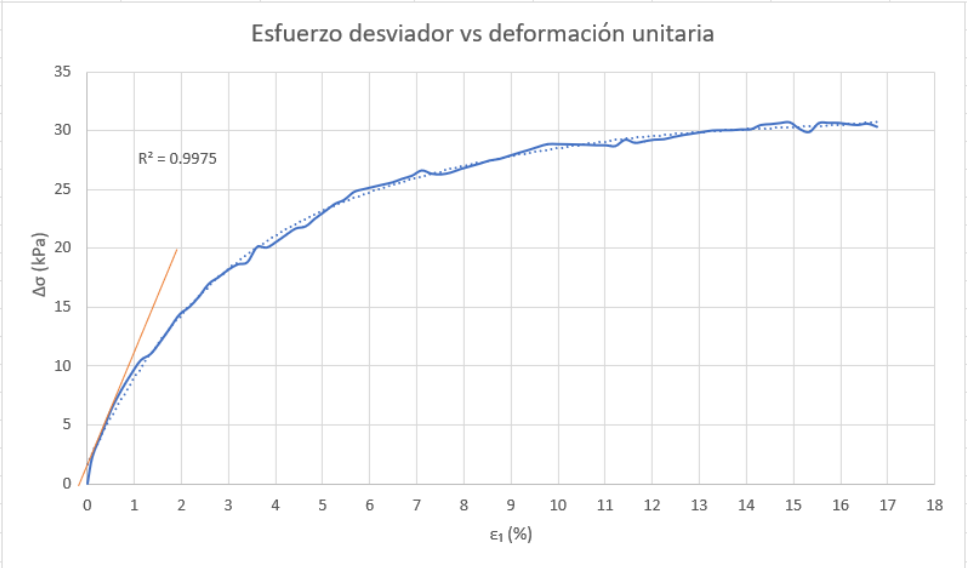
P02

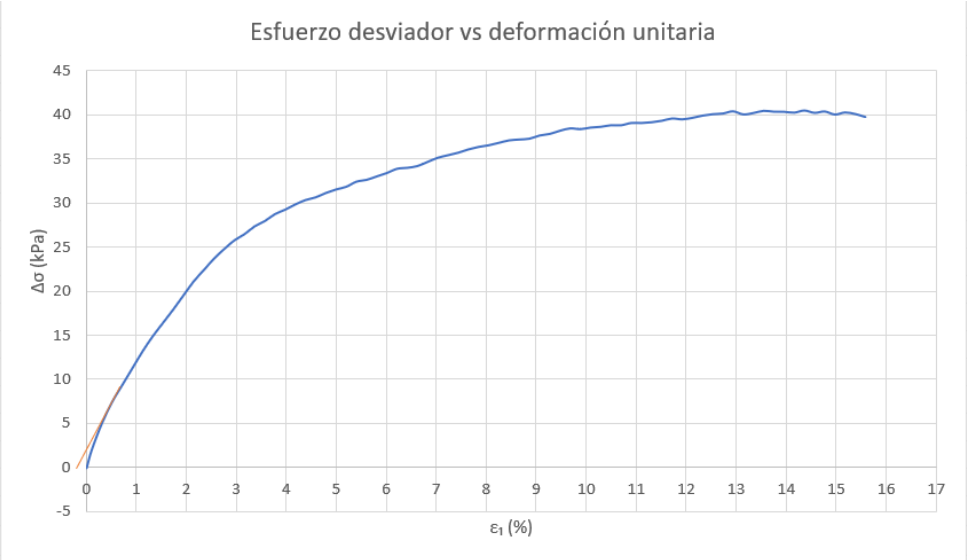
Prof. 0-1

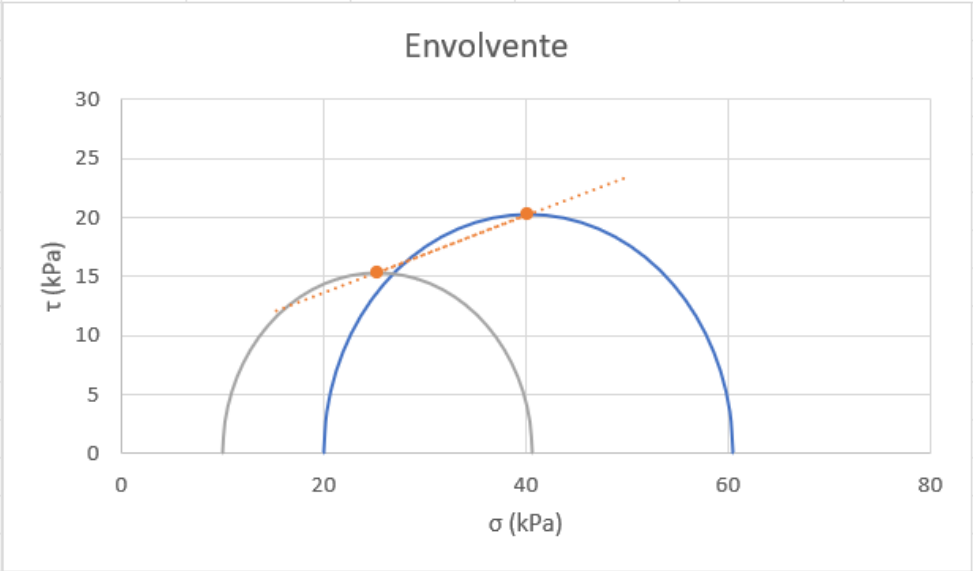




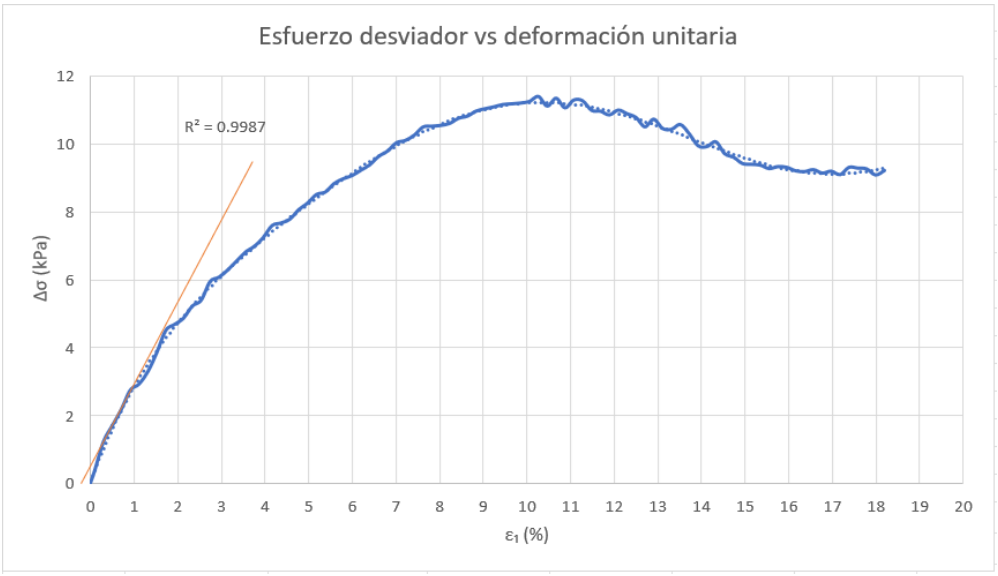
Prof. 1-2

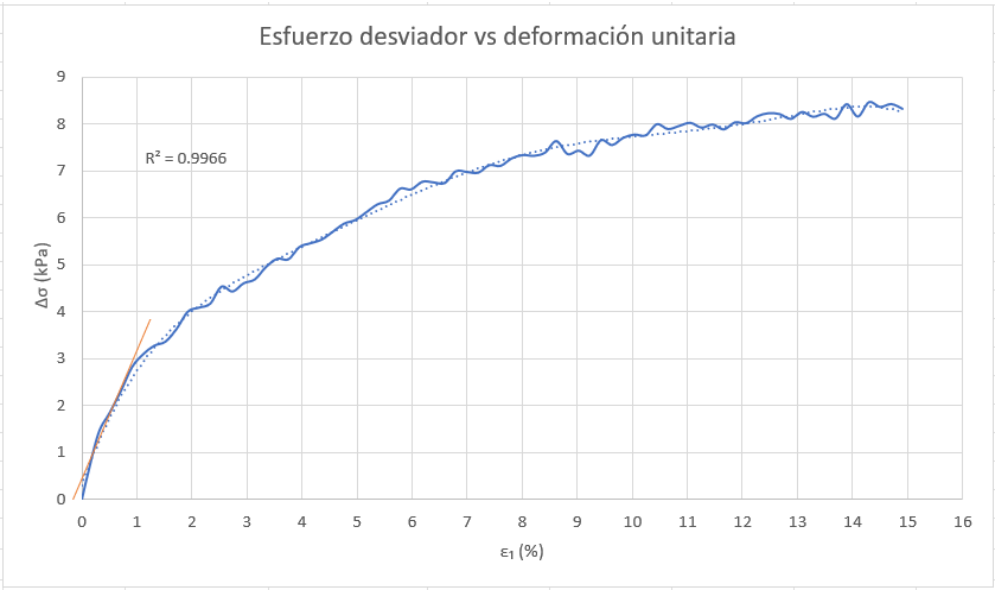

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9975
Δσ (kPa)
ε1 (%)

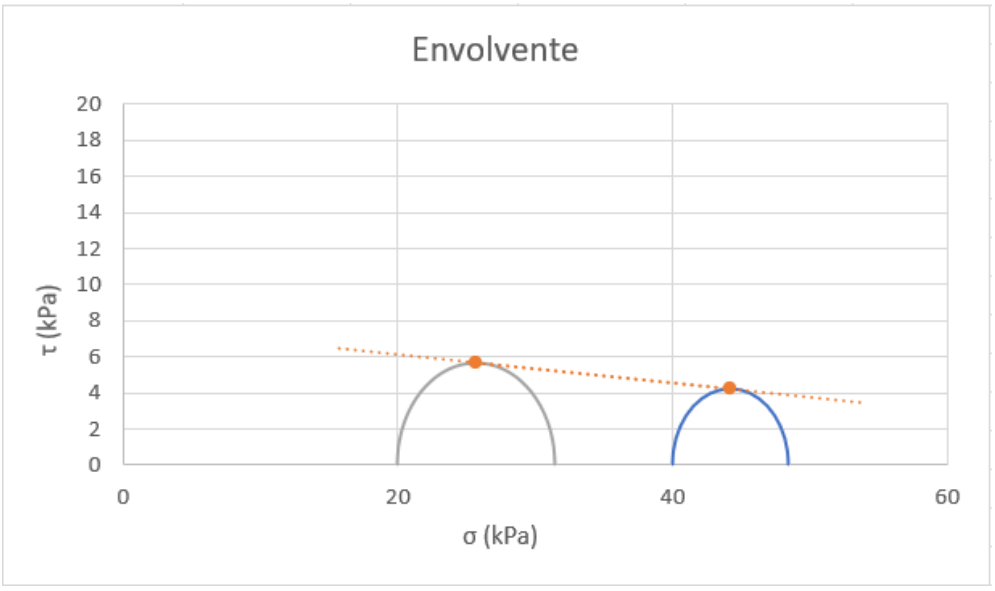

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

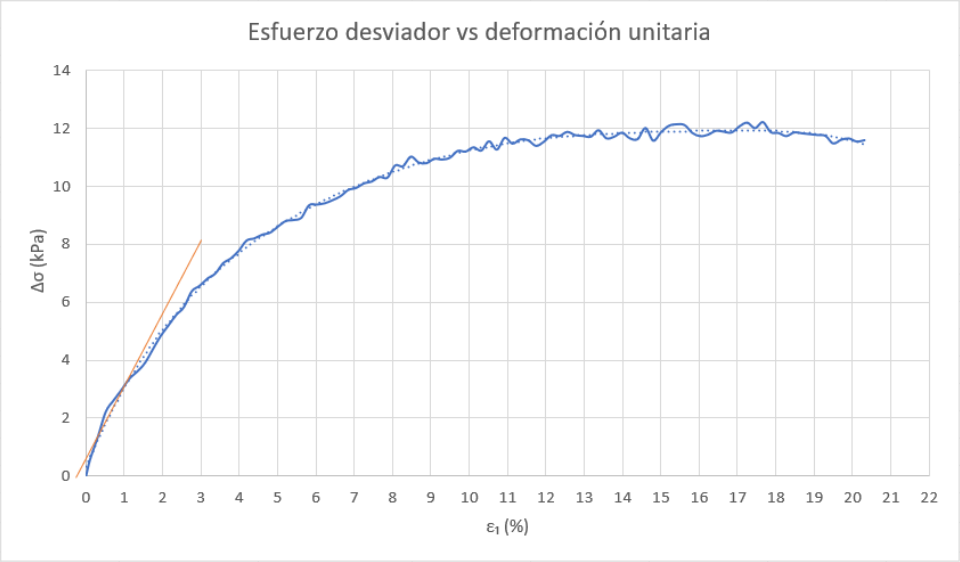
Prof. 2-3

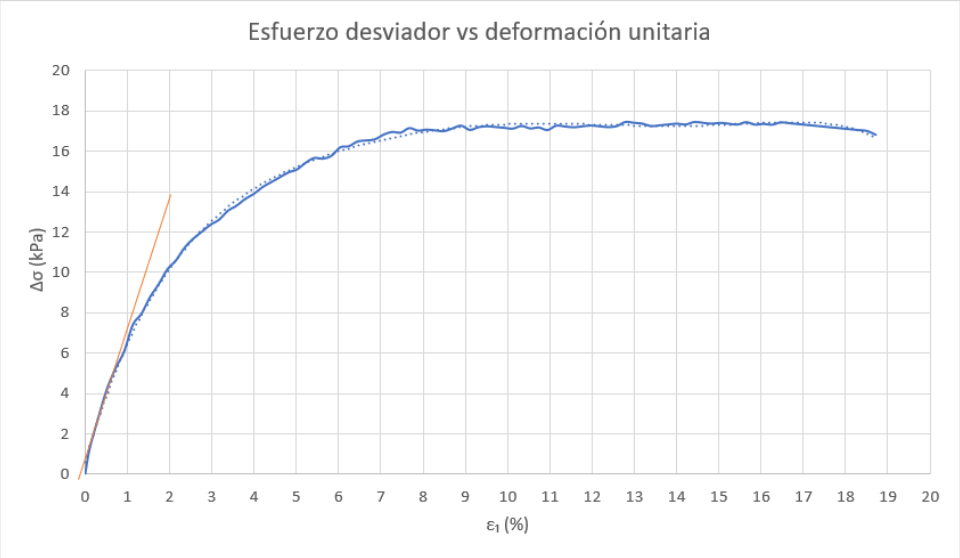

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9987
Δσ (kPa)
ε1 (%)

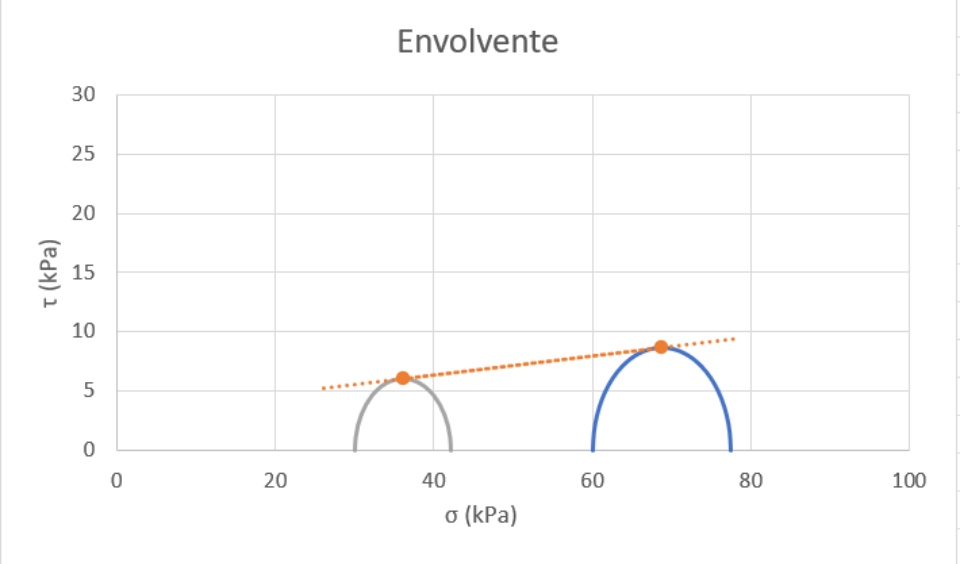

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9966
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

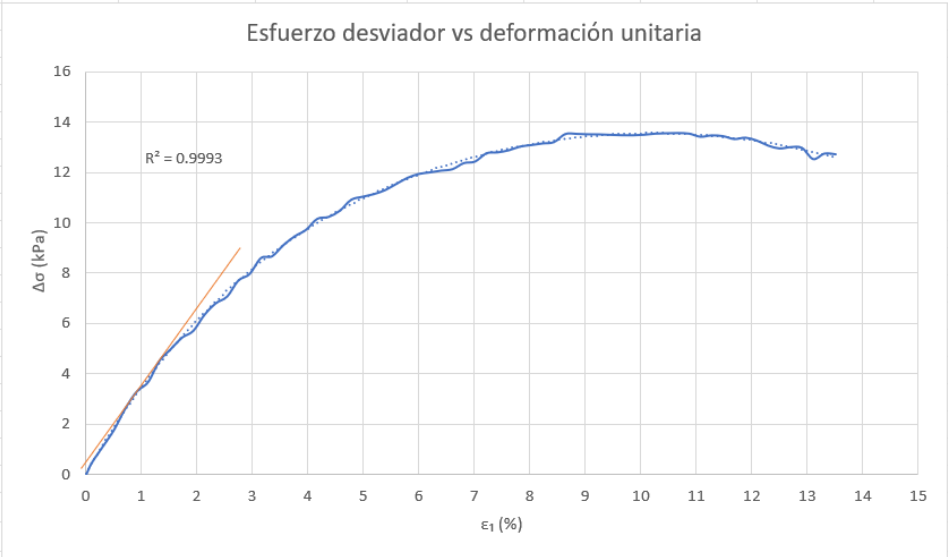
Prof. 3-4

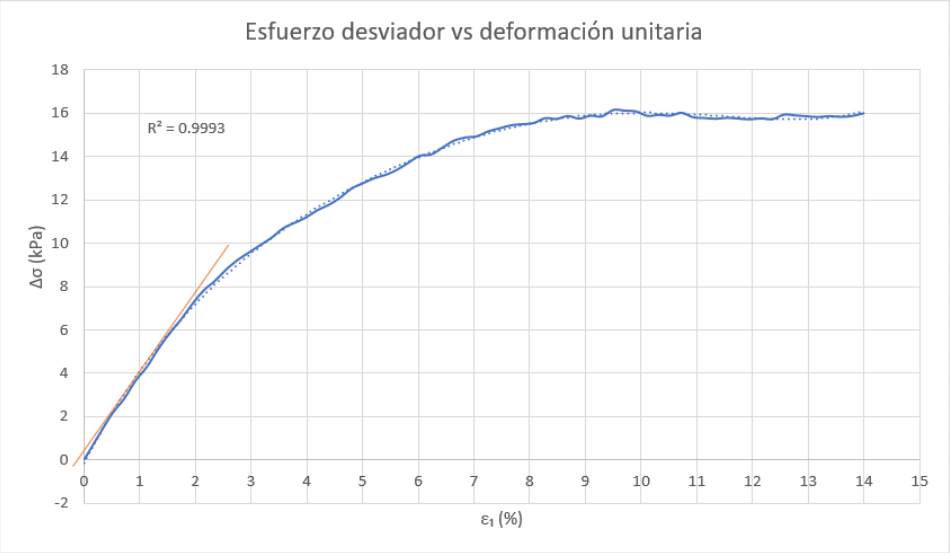

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)

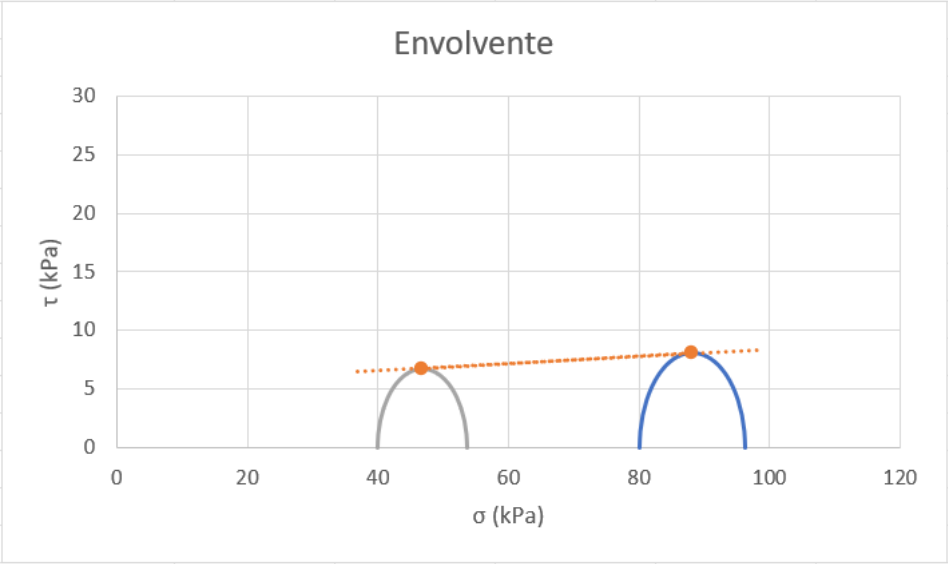

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

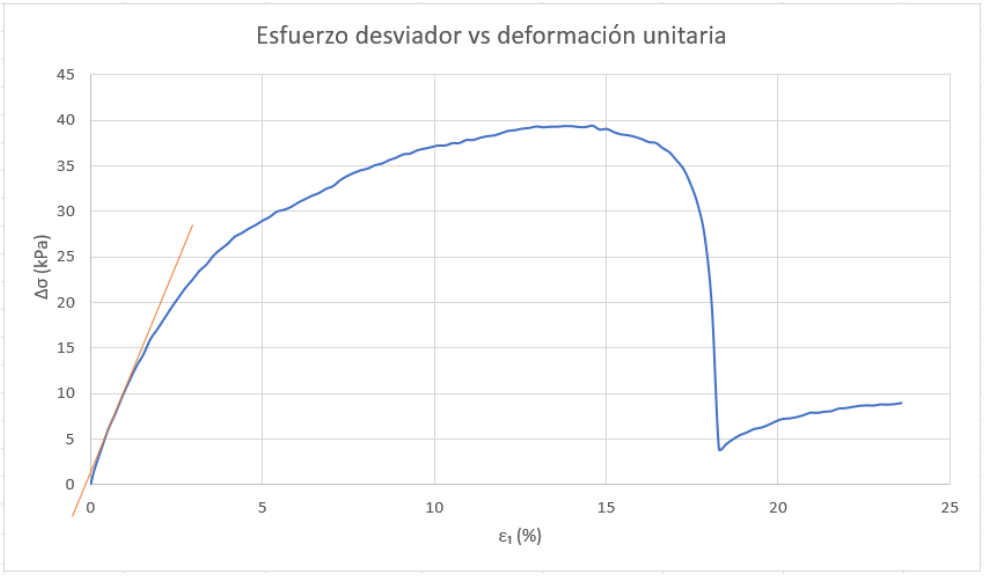
Prof. 4-5

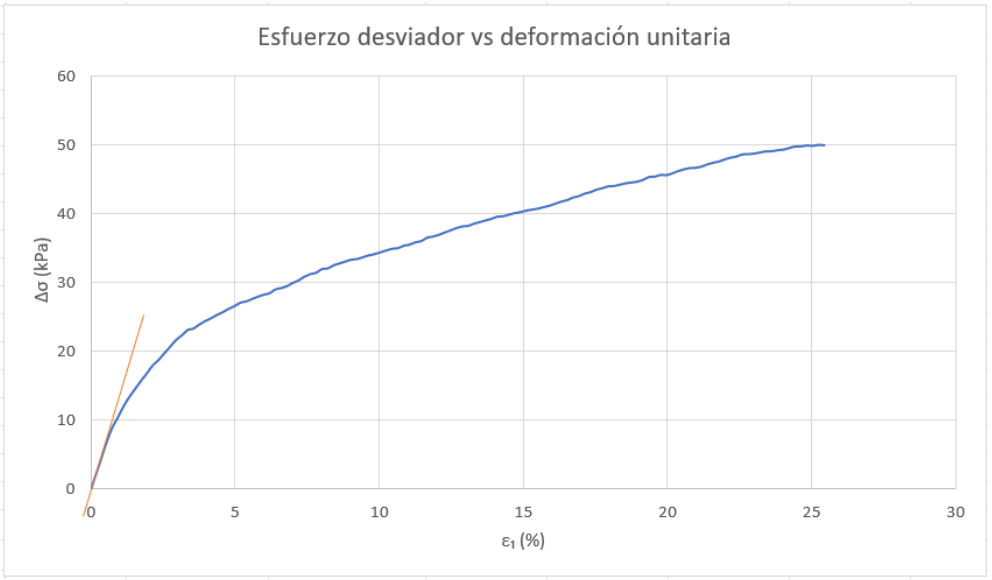

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9993
Δσ (kPa)
ε₁ (%)

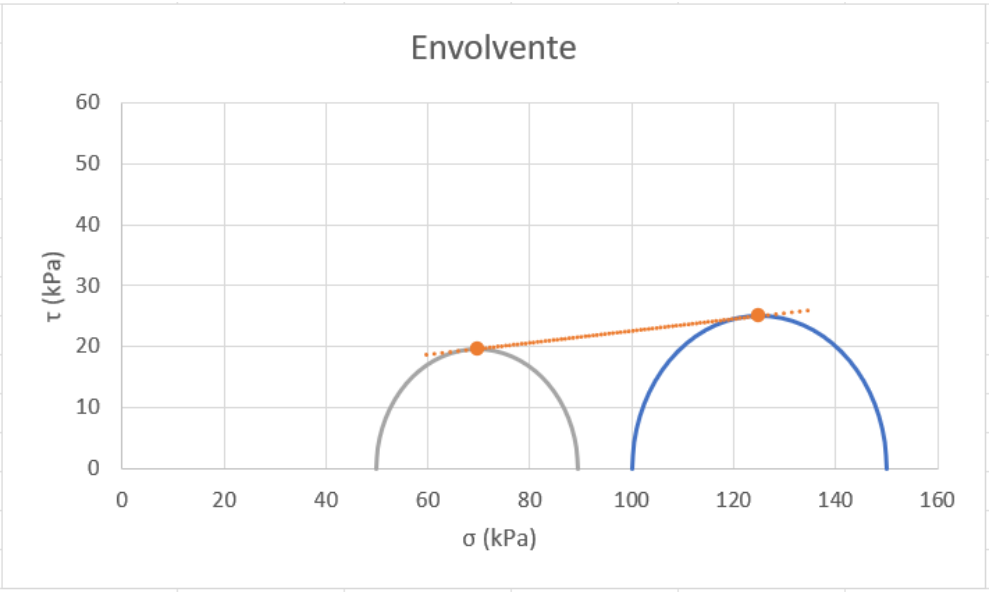

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9993
Δσ (kPa)
ε₁ (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

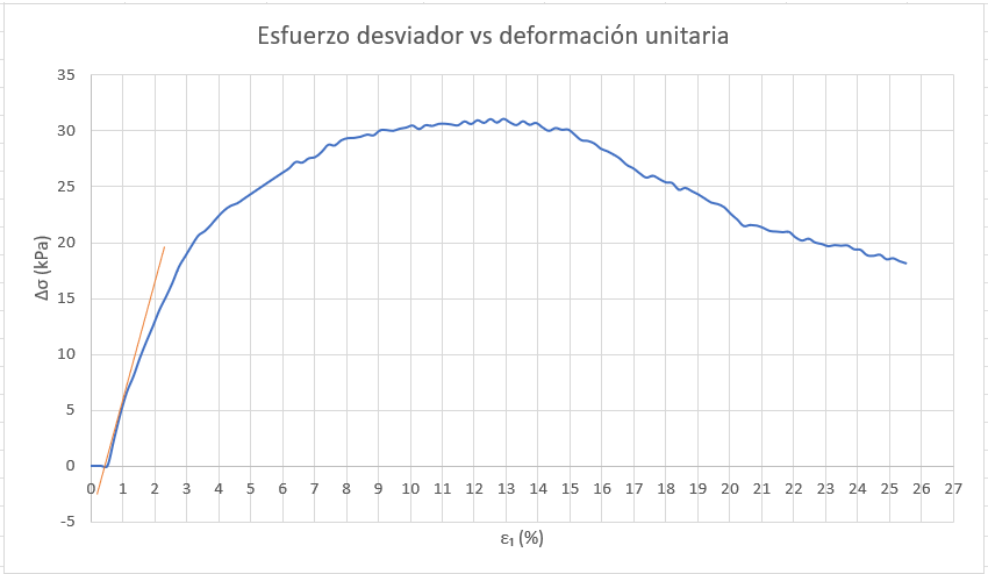
Prof. 5-6

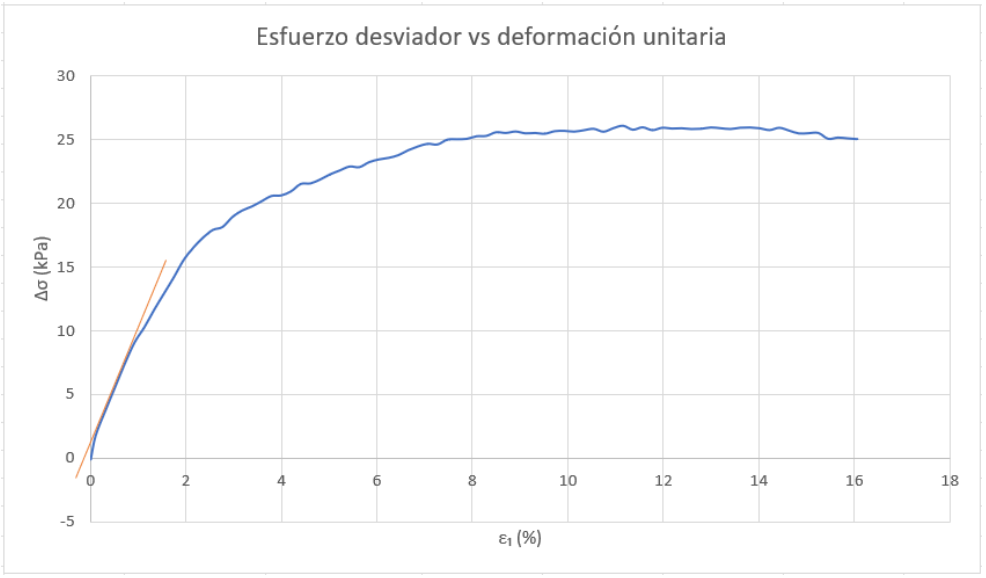

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45

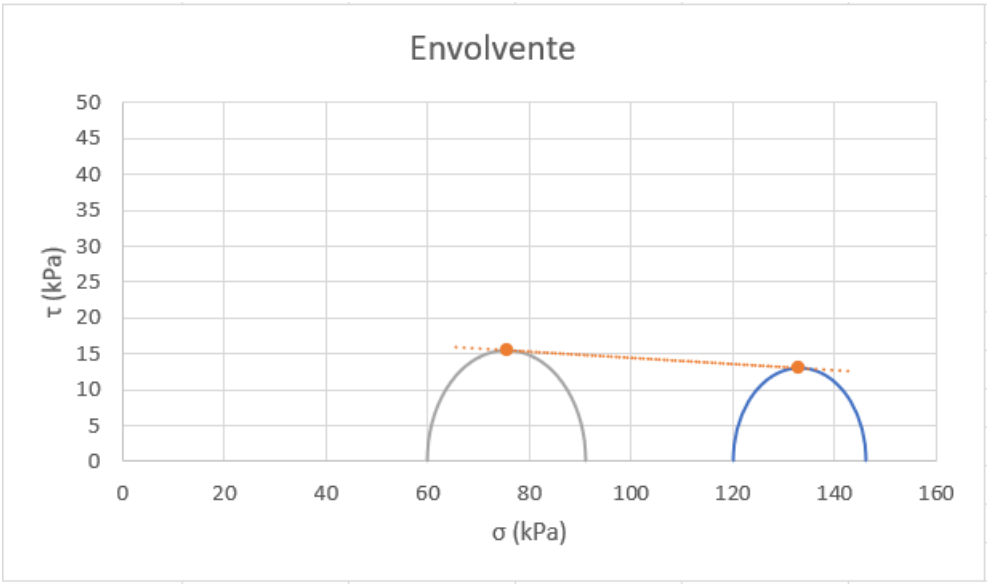

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
0
10
20
30
40
50
60


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)
0
10
20
30
40
50
60
0
20
40
60
80
100
120
140
160

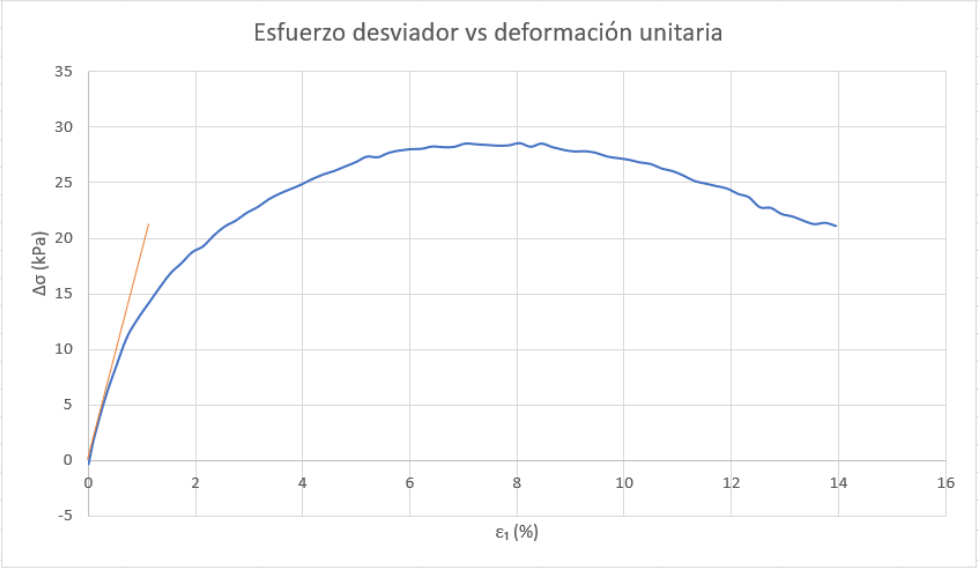
Prof. 7-8

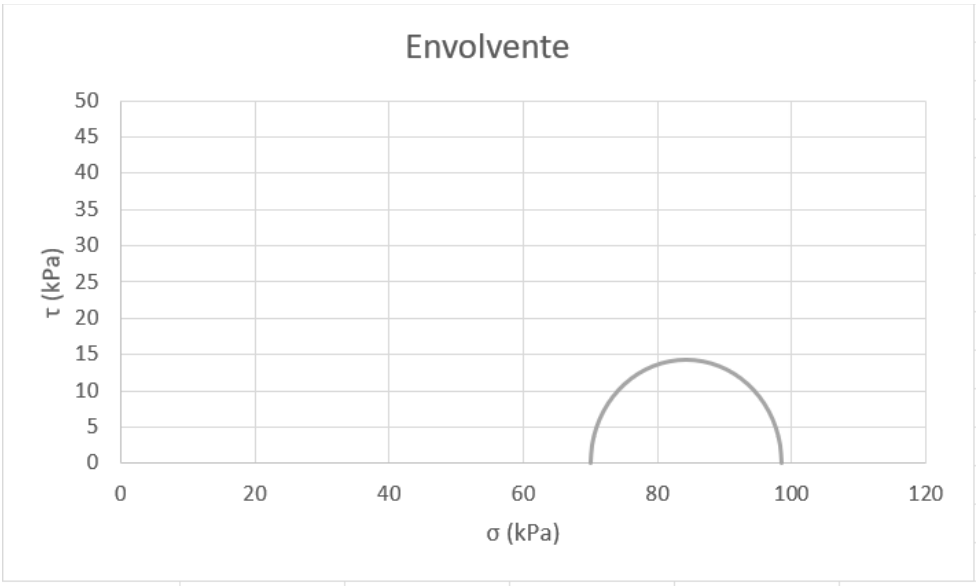

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27
ε1 (%)


Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
30
25
20
15
10
5
0
-5
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0 20 40 60 80 100 120 140 160
σ (kPa)

Prof. 9-10

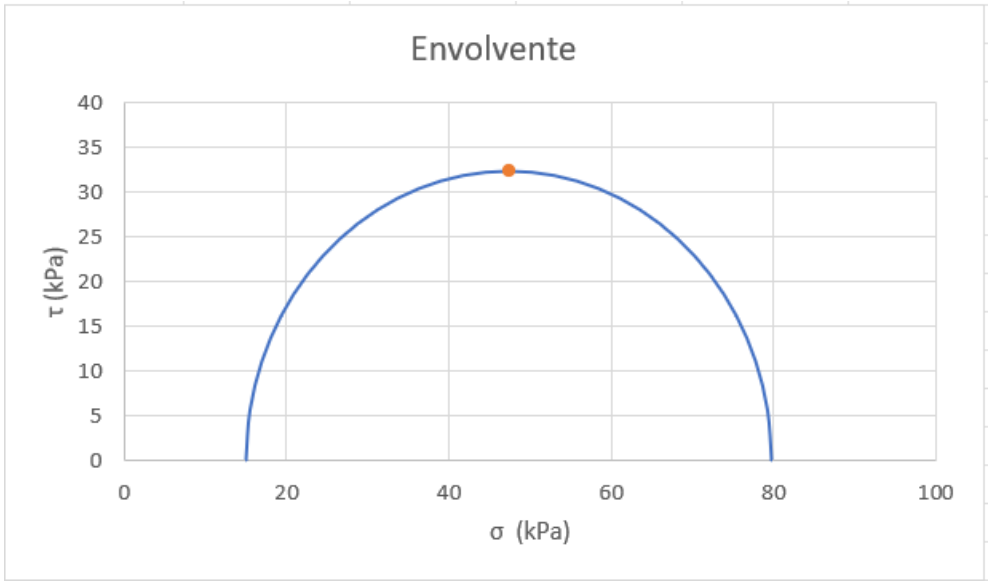

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
0
2
4
6
8
10
12
14
16
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80
100
120
σ (kPa)

P03

Prof. 0-1

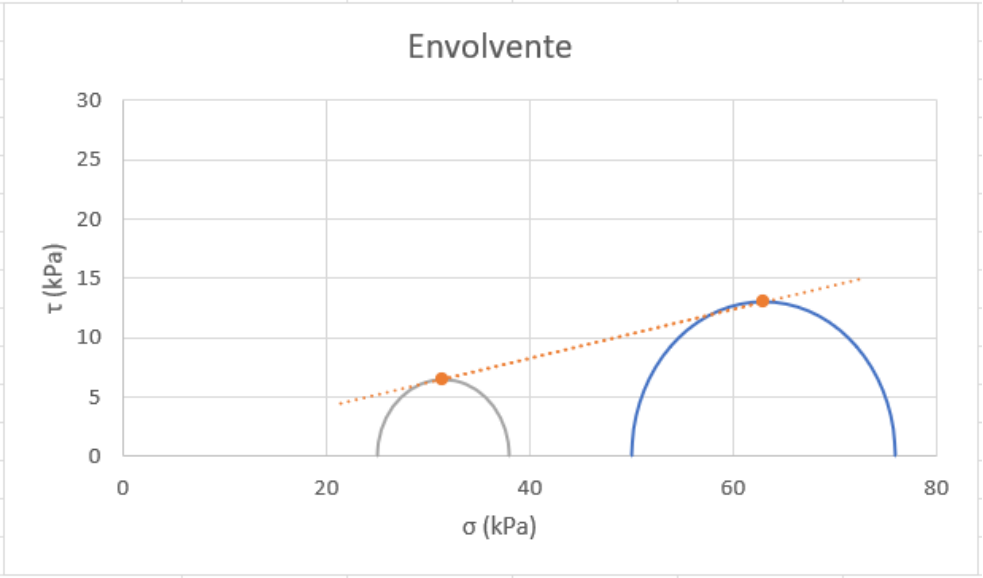




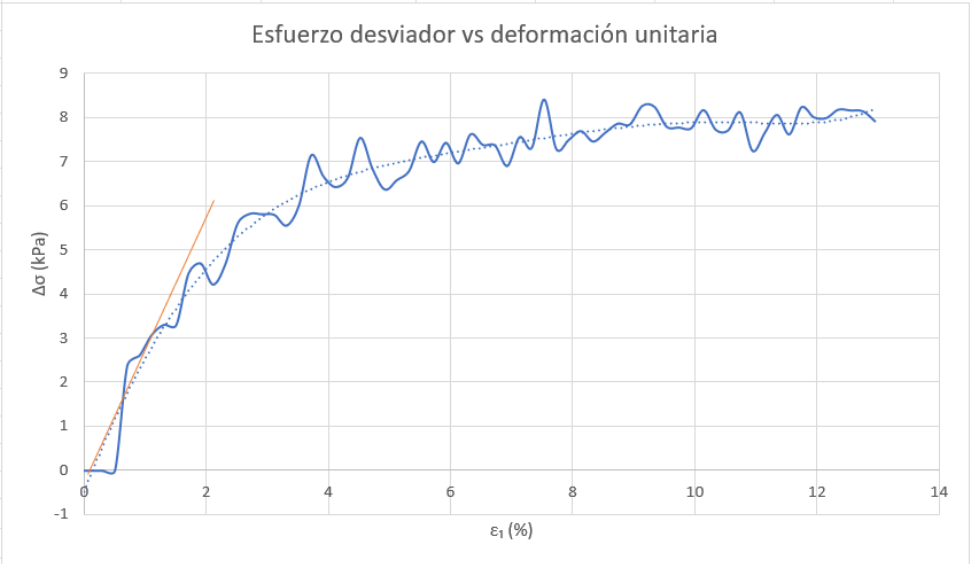
Prof. 1-2

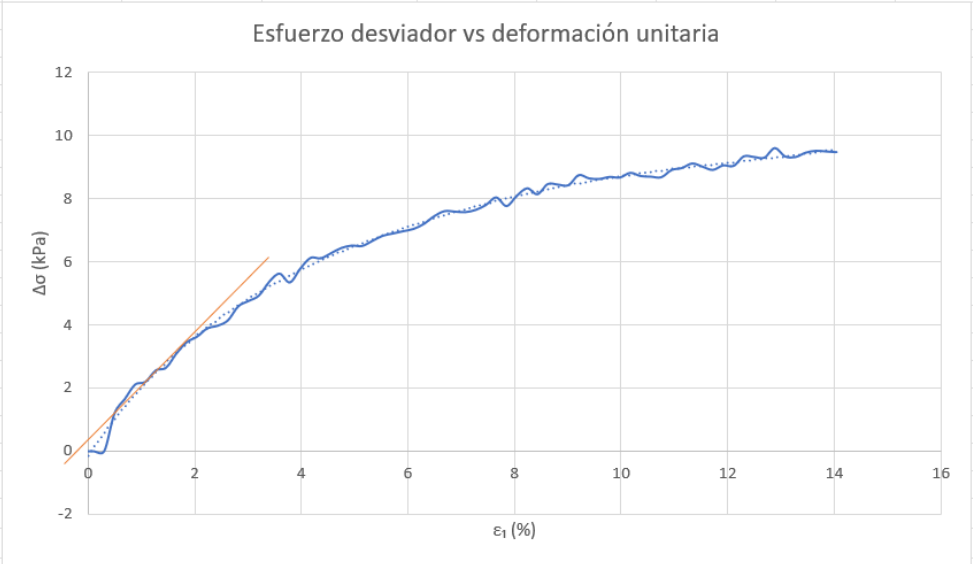

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9982
Δσ (kPa)
ε1 (%)

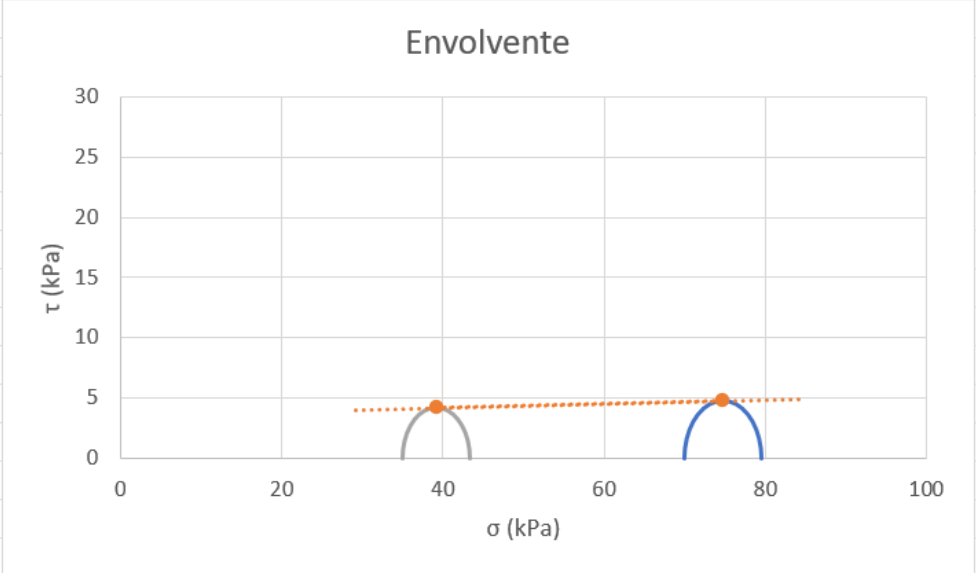

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

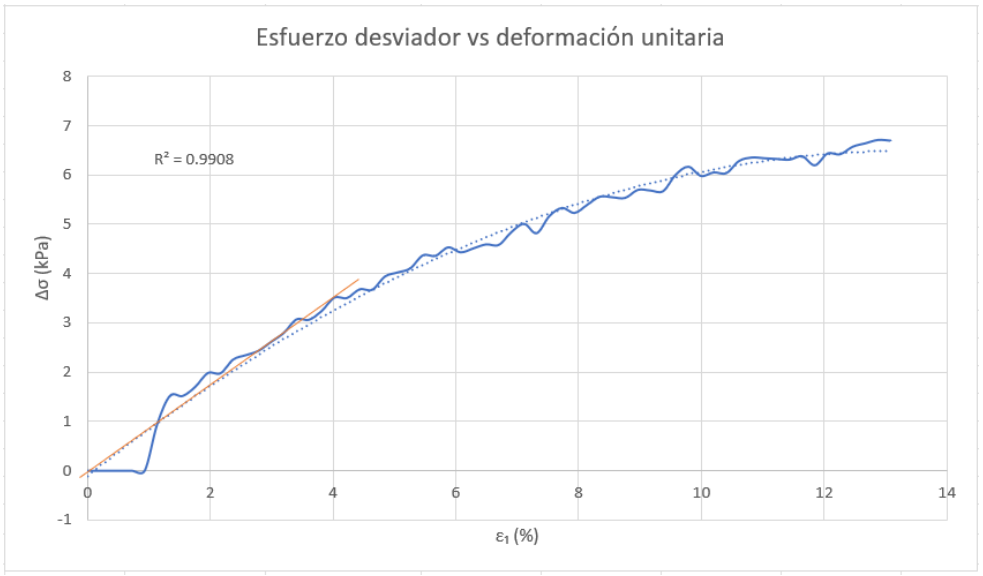
Prof. 2-3

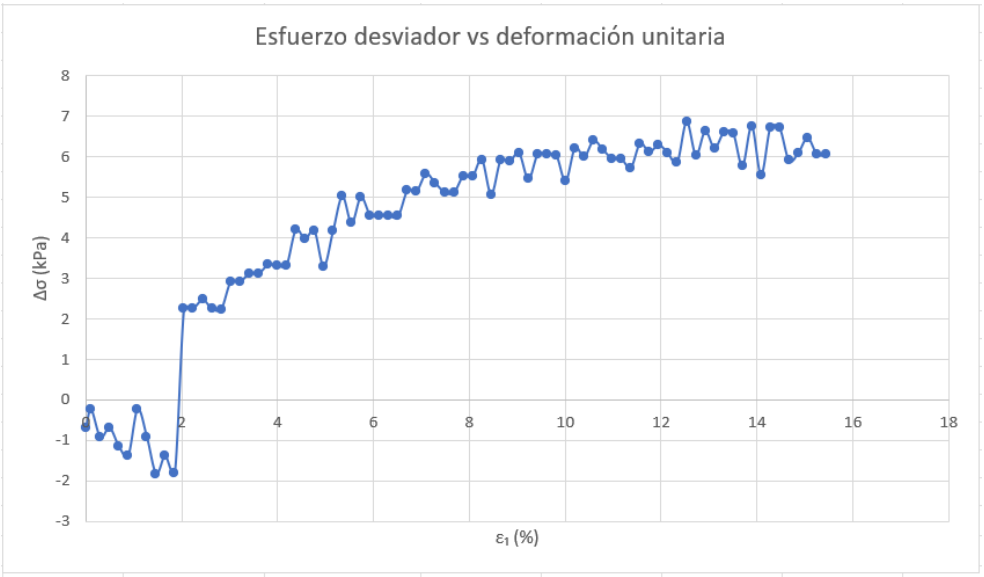

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)

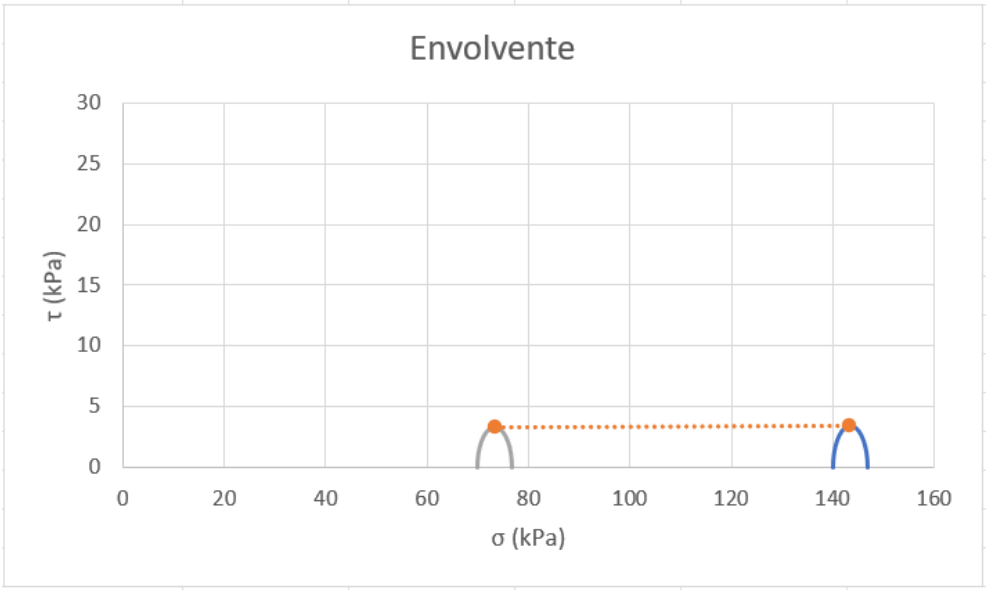

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

Prof. 5-6

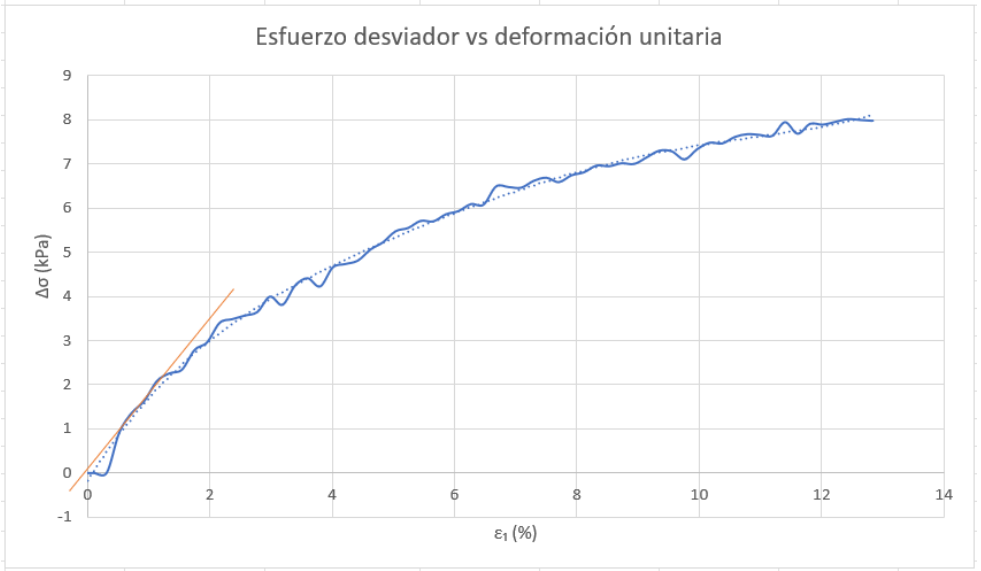

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9908
Δσ (kPa)
ε₁ (%)

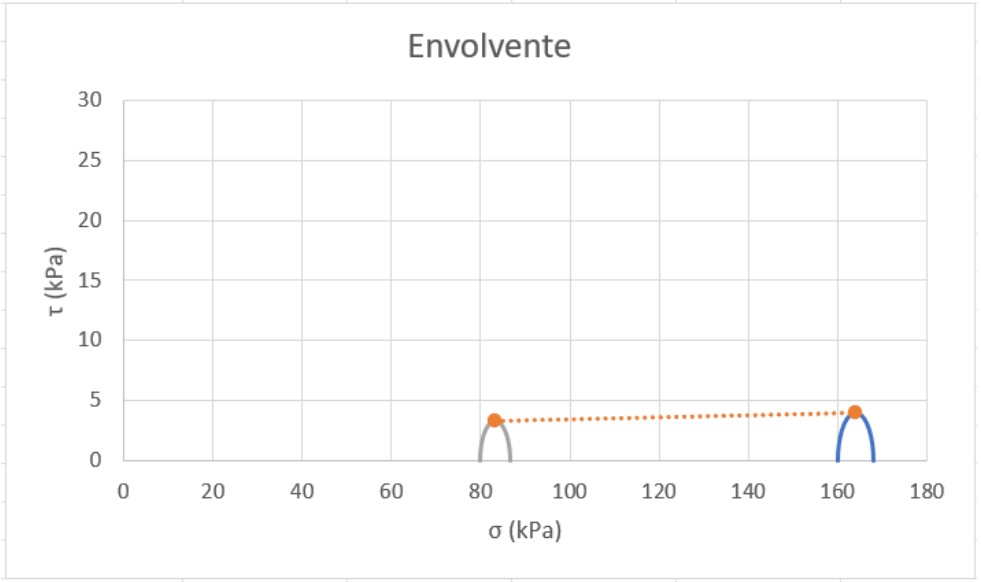

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε₁ (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

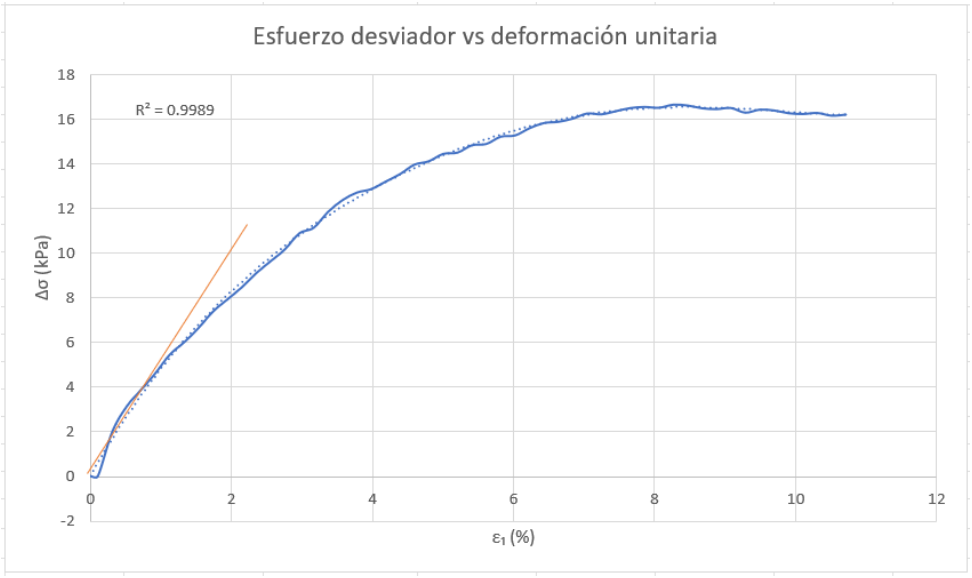
Prof. 6-7

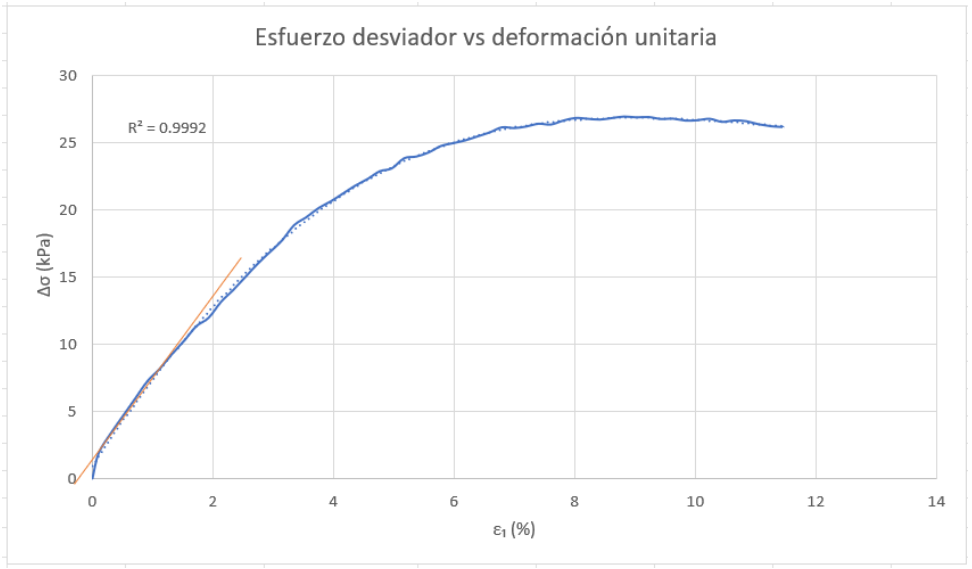

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9981
Δσ (kPa)
ε1 (%)

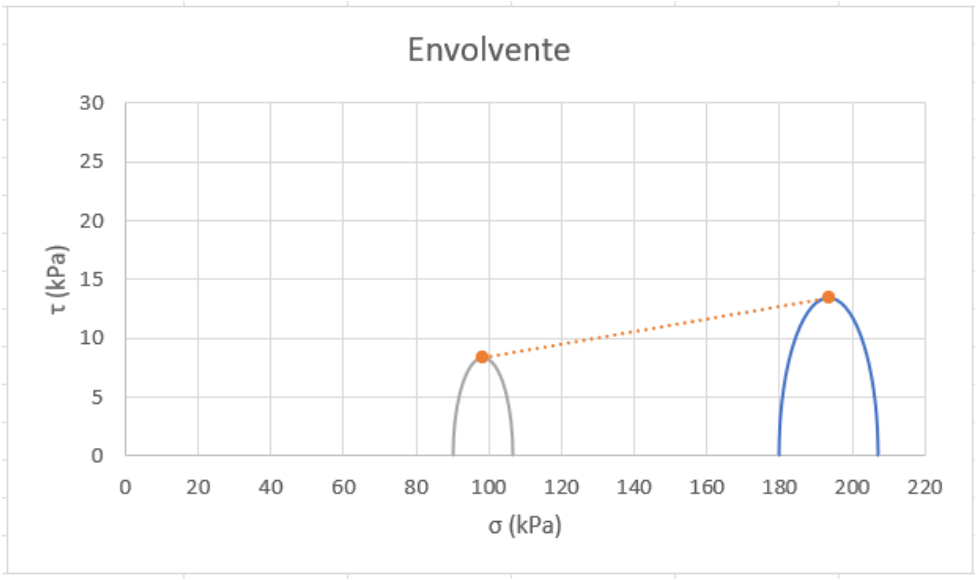

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

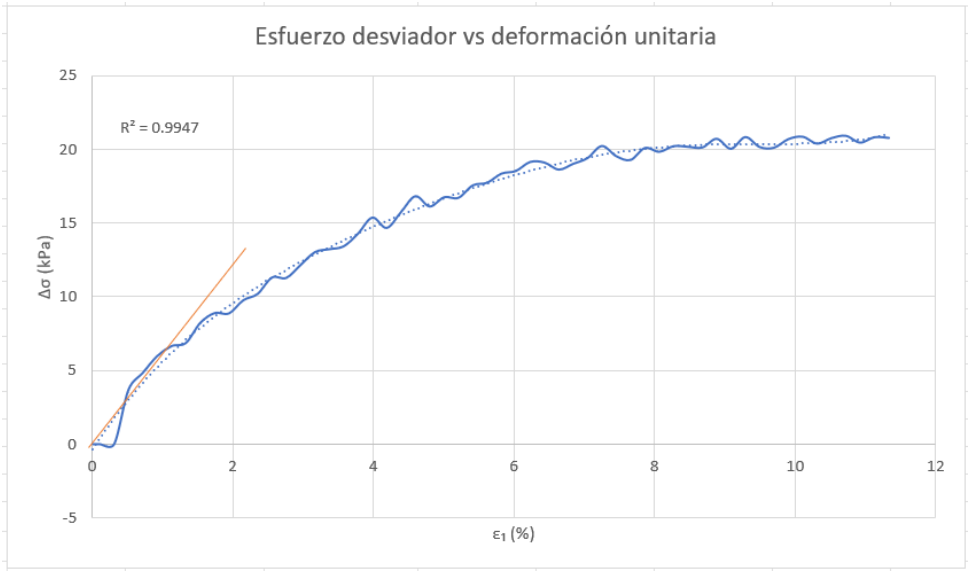
Prof. 7-8

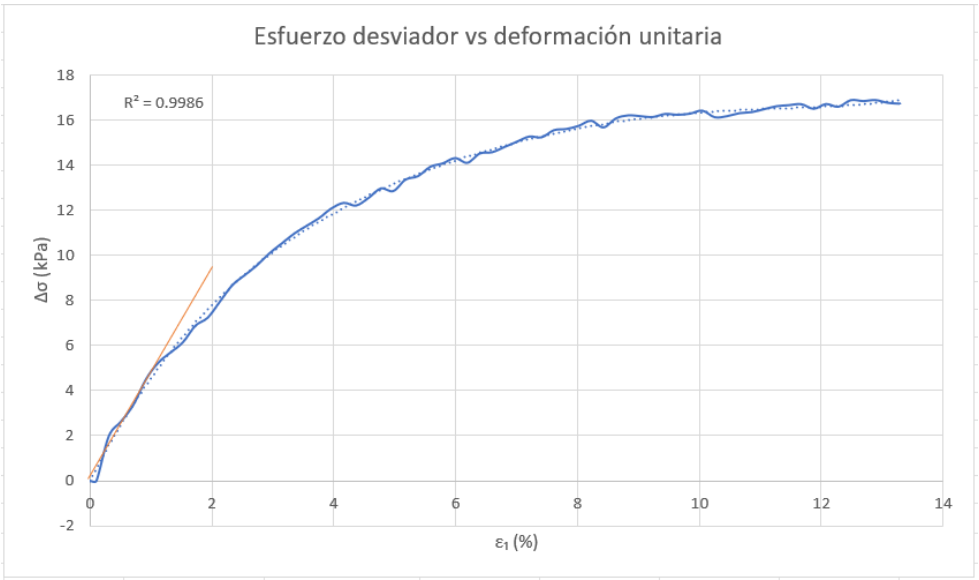

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9989
Δσ (kPa)
ε1 (%)

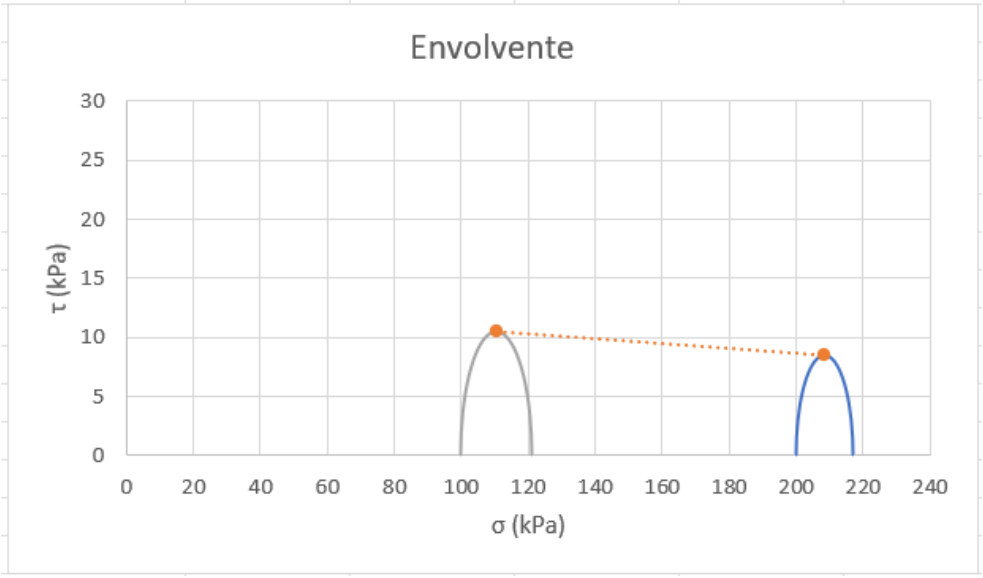

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9992
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

Prof. 8-9

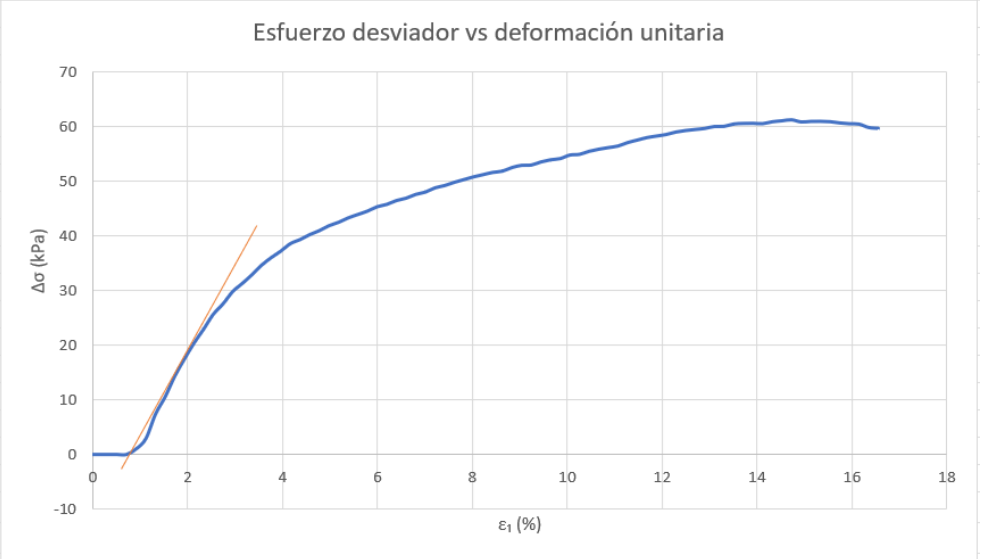

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9947
Δσ (kPa)
ε1 (%)

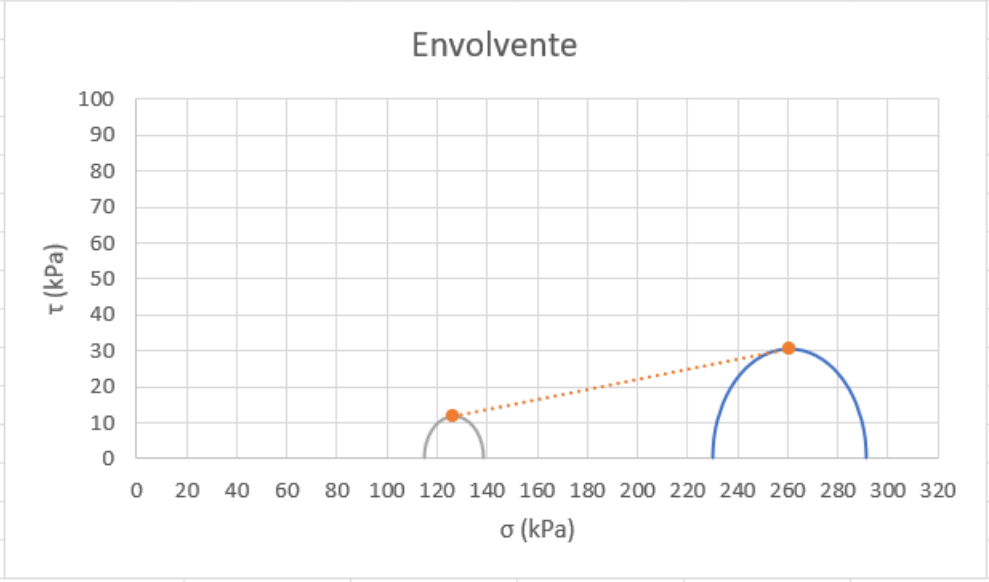

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
R² = 0.9986
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

Prof. 9-10

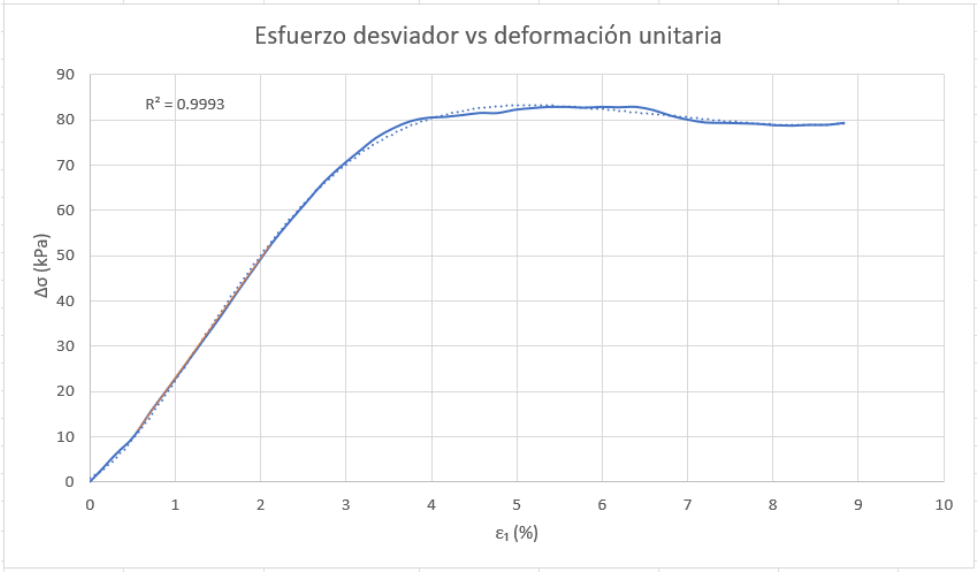

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)

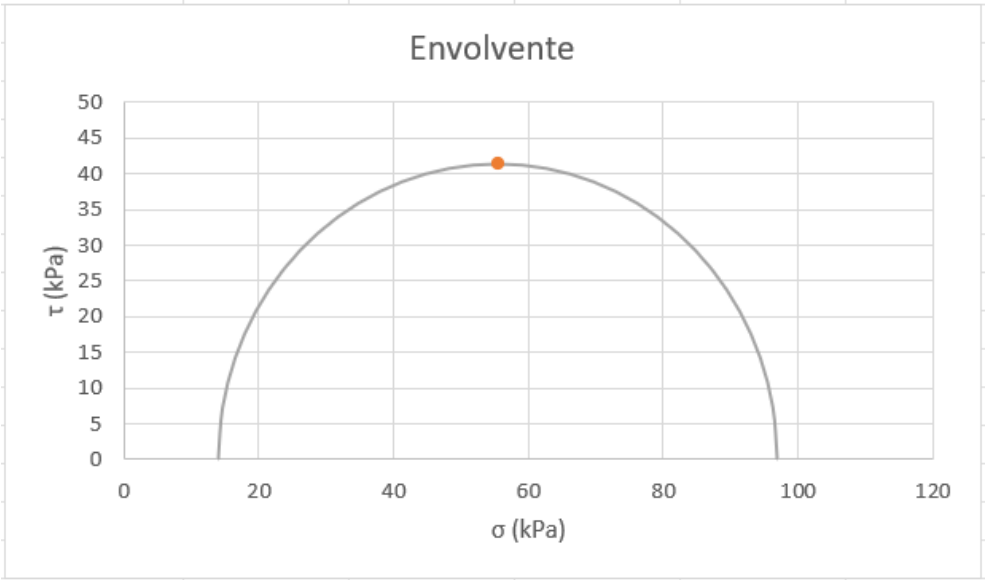

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

P04

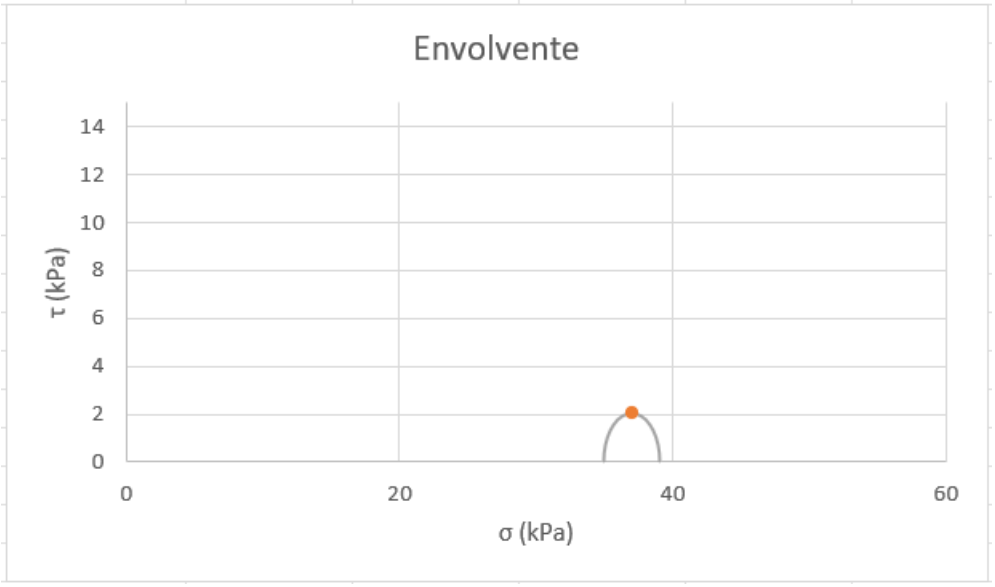
Prof. 0-1



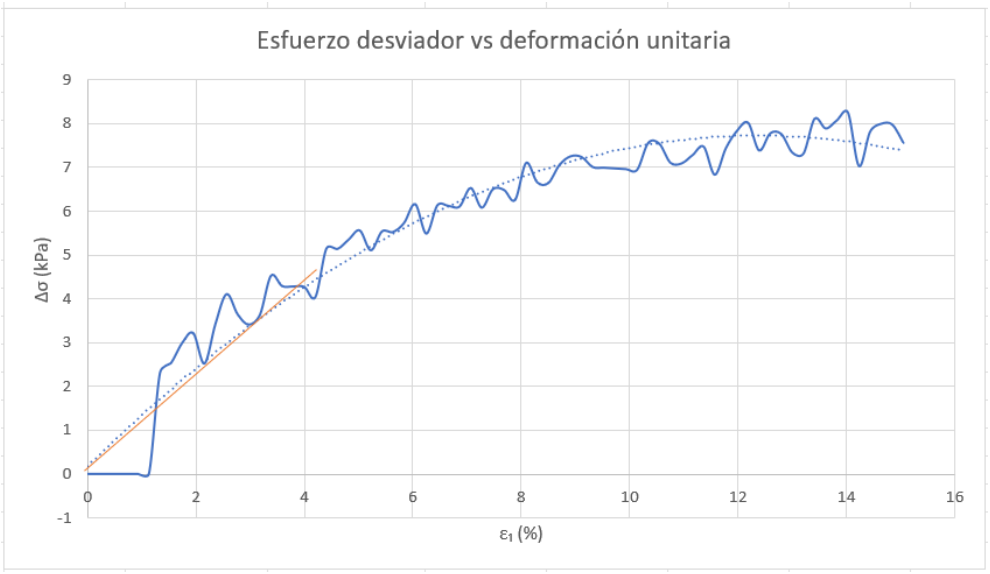


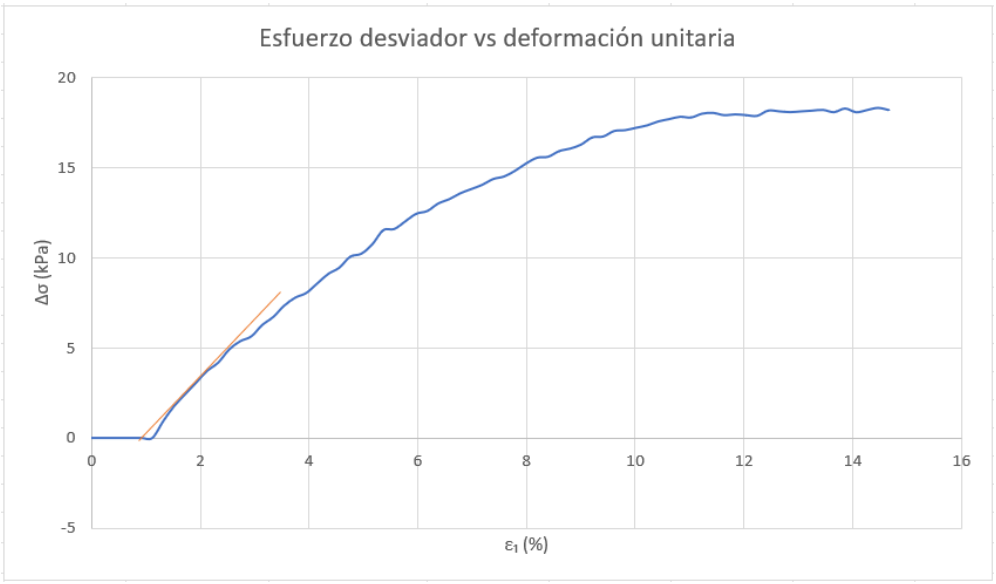
Prof. 2-3

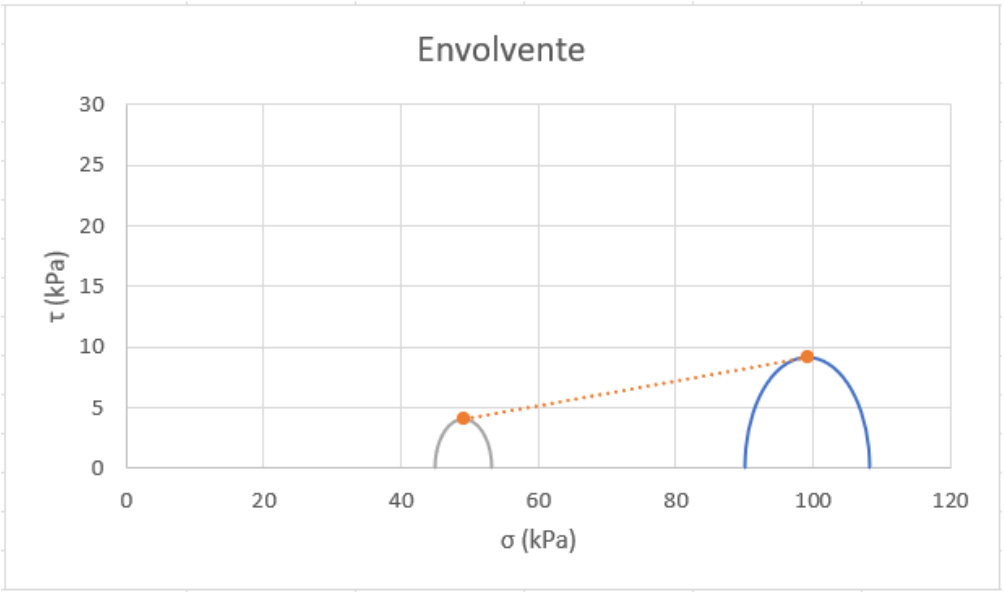

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
0
2
4
6
8
10
12
14
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
14
12
10
8
6
4
2
0
0
20
40
60
σ (kPa)

Prof. 3-4

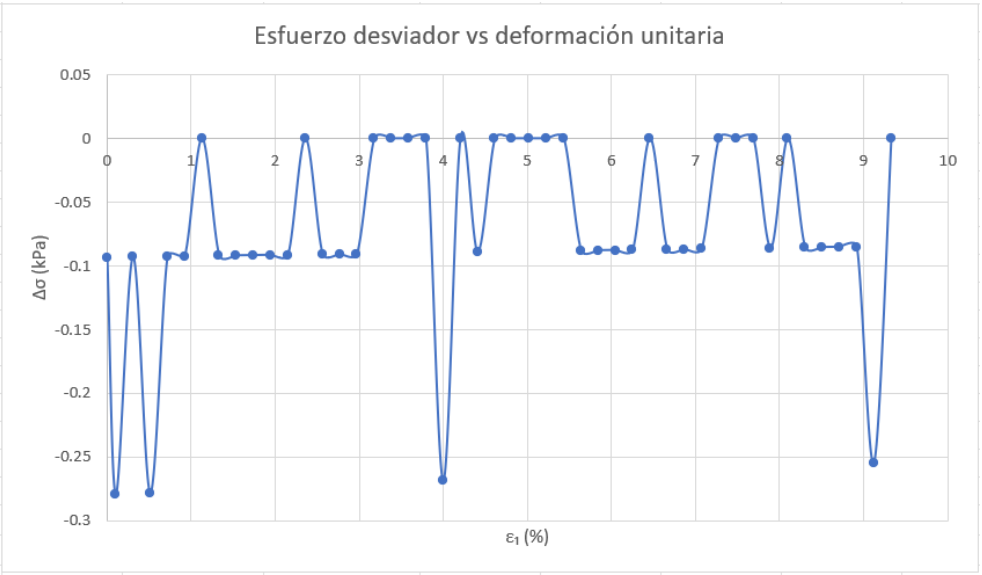

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)

Prof. 4-5

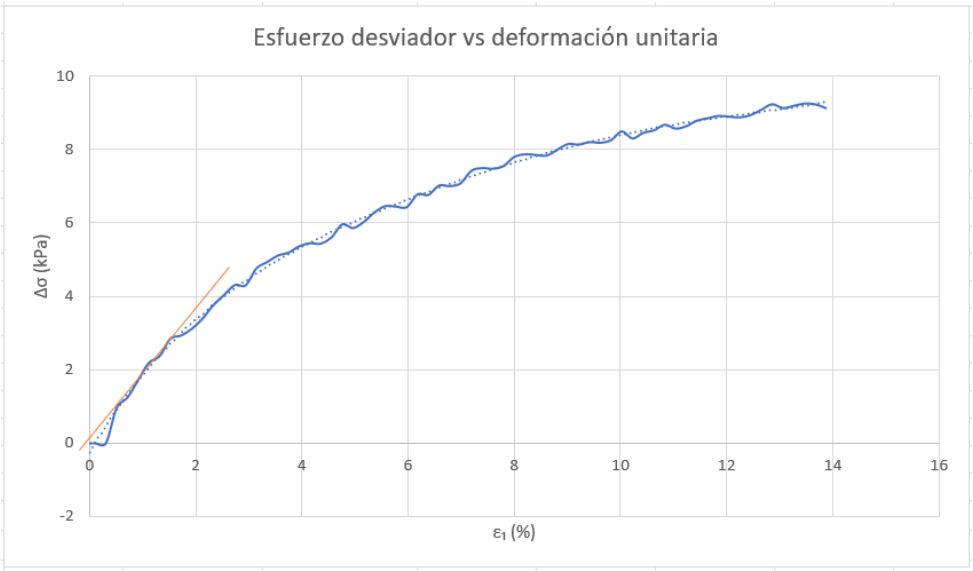


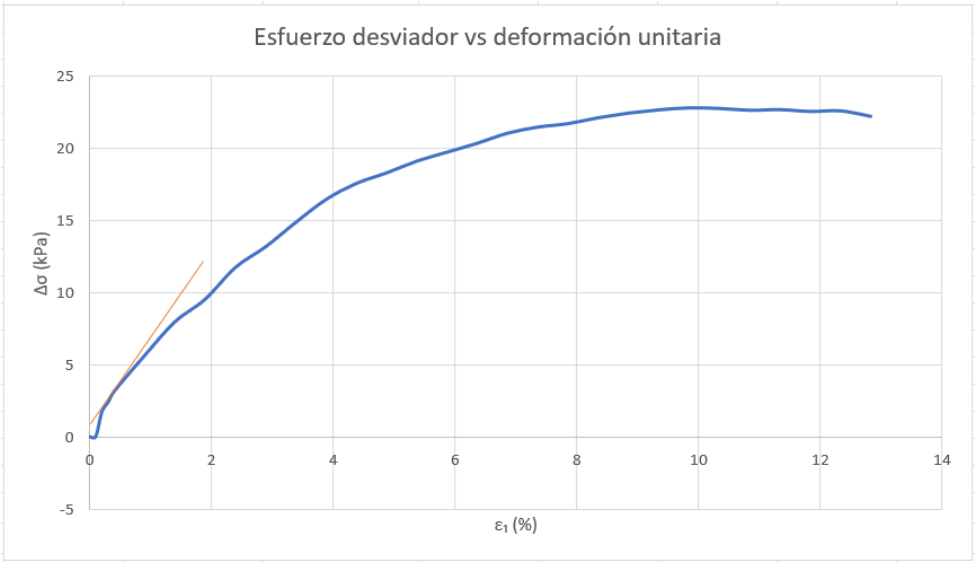


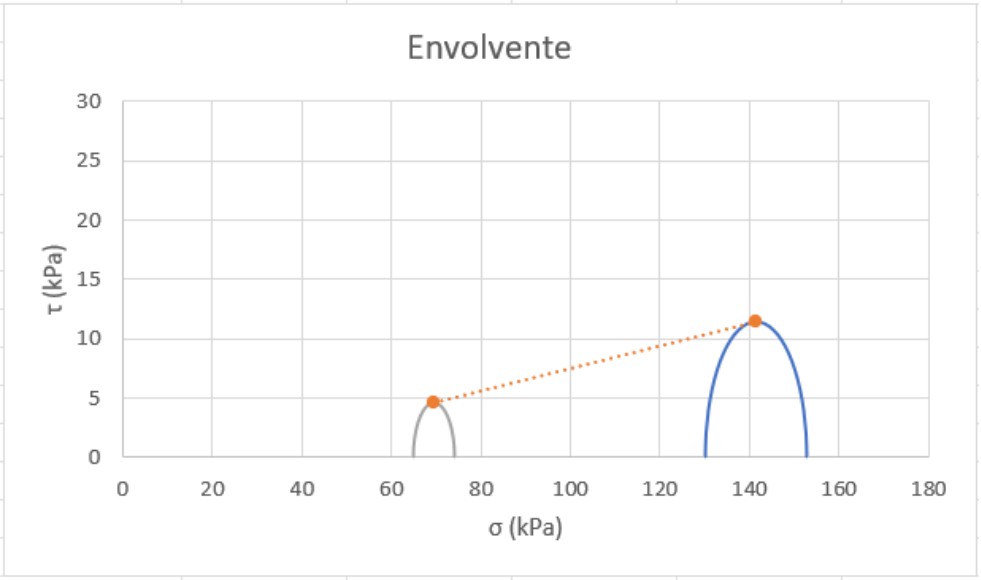


Material lodoso razón por la cual los triaxiales presentan un esfuerzo de 0 dado que no resistió carga.

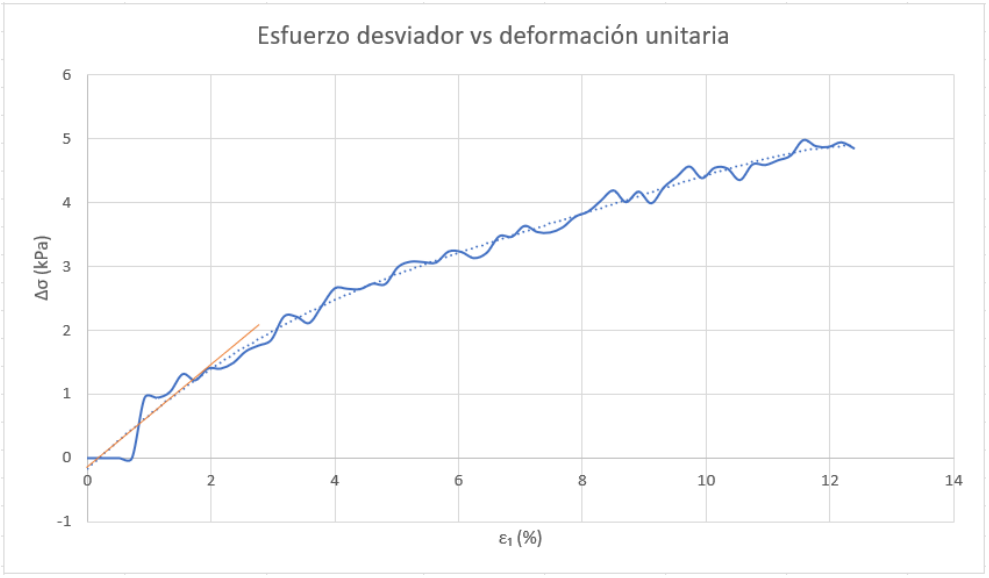
Prof. 5-6

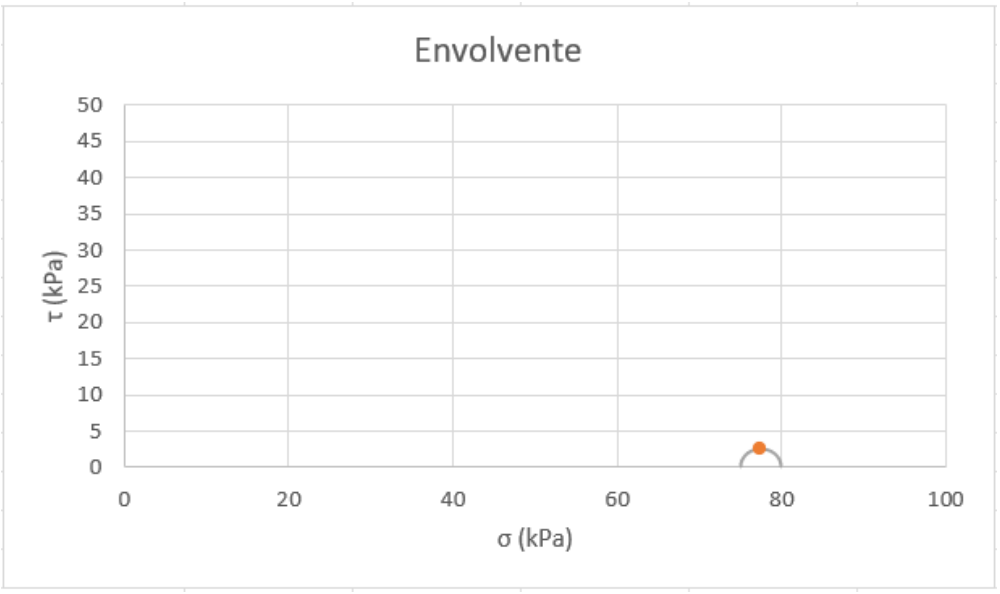

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
10
8
6
4
2
0
-2
0
2
4
6
8
10
12
14
16


Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
25
20
15
10
5
0
-5
0
2
4
6
8
10
12
14


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)
30
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180

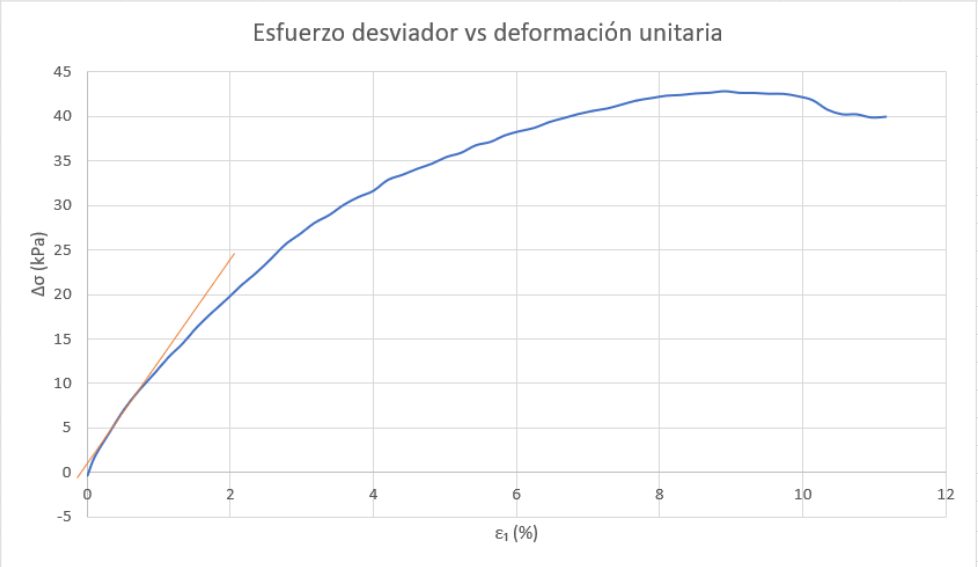
Prof. 6-7

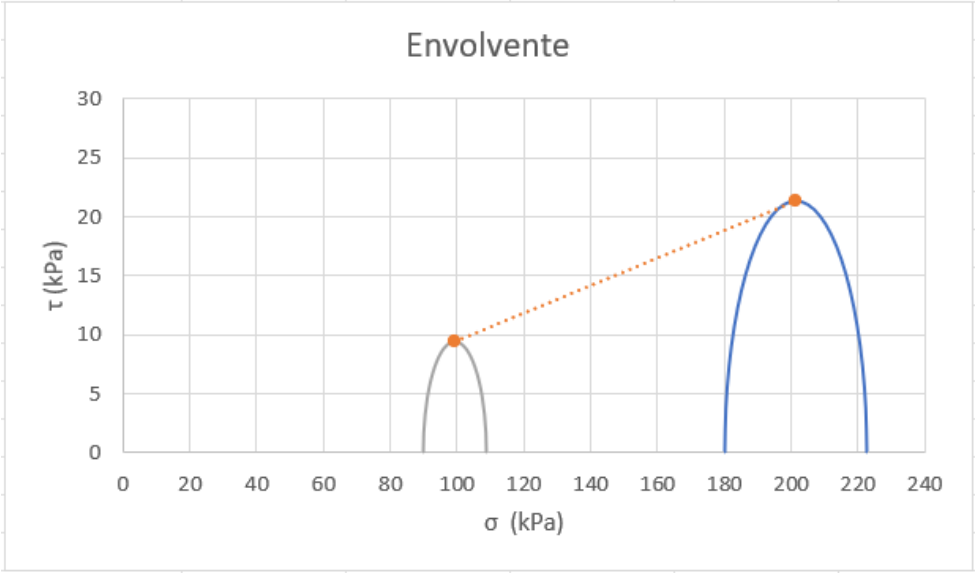

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
6
5
4
3
2
1
0
-1
0
2
4
6
8
10
12
14


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80
100

Prof. 7-8

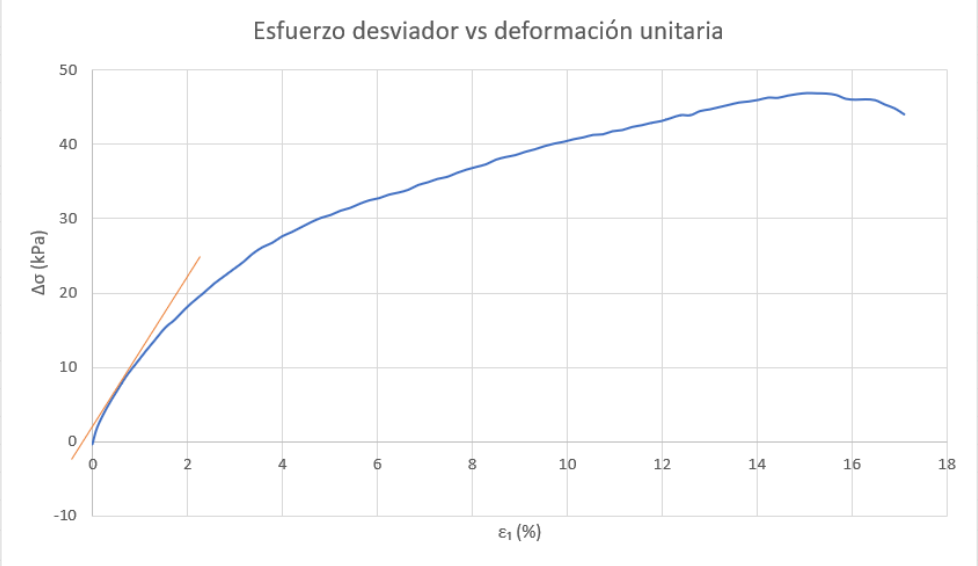

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
20
15
10
5
0
-5
0
2
4
6
8
10
12

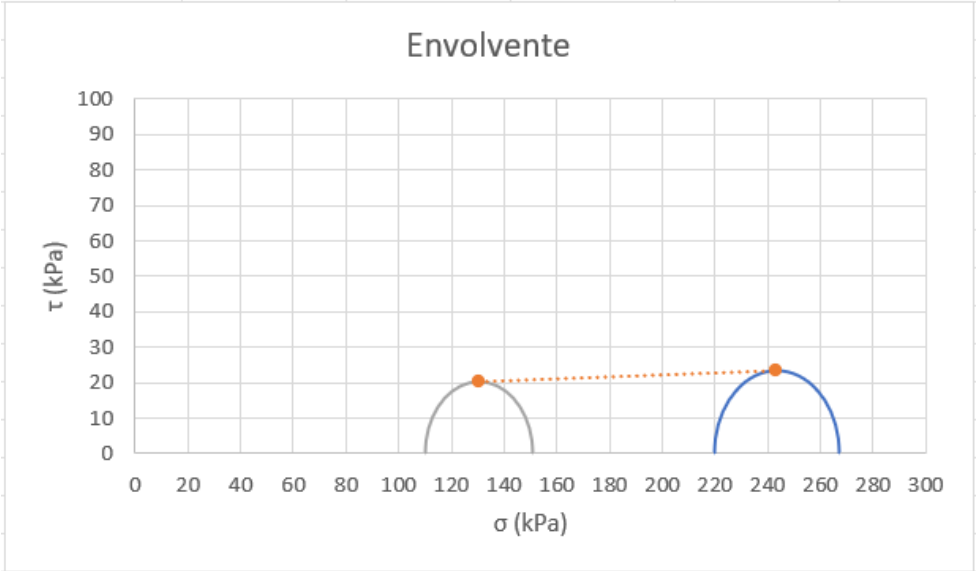

Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
ε1 (%)
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
0
2
4
6
8
10
12


Envolvente
τ (kPa)
σ (kPa)
30
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240

Prof. 9-10


Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-5
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
ε1 (%)


Esfuerzo desviador vs deformación unitaria
Δσ (kPa)
50
40
30
20
10
0
-10
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
ε1 (%)


Envolvente
τ (kPa)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
σ (kPa)

ANEXO 2. TABLAS RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS POR ENSAYOS O POR CÁLCULOS.

MÓDULO DE DEFORMACIÓN RESTRINGIDO (MPa)

Profundidad (m)	P01	P02	P03	P04	Promedio	Desviación Estándar
1	2940.68	6203.99	1891.55	2565.42	3400.41	1661.72
2		992.81	324.28		658.54	334.26
3		231.29	127.17		179.23	52.06
4		244.58		90.26	167.42	77.16
5	137.94	306.97			222.45	84.52
6	370.81	883.13	93.29	161.8	377.25	309.44
7	433.75		129.67	150.63	238.02	138.67
8	761.38	904.16	425.11	507.33	649.50	192.31
9	583.8		457.14		520.47	63.33
10	820.68	1740.42	572.69	860.1	998.47	442.30

Cohesión (kPa)

PROFUNDIDAD (M)	P01	P02	P03	P04	Promedio	Desviación Estándar
1	40.64	94.3	32.4	41.47	52.20	24.56
2		15.36	6.52		10.94	4.42
3		4.23	4.2	2.04	3.49	1.03
4		6.11		4.13	5.12	0.99
5	2.15	6.79			4.47	2.32
6	5.37	19.69	3.35	4.63	8.26	6.64
7	5.03		3.37	2.49	3.63	1.05
8	13.04	13.03	8.35	9.45	10.97	2.10
9	10.55		8.44		9.50	1.05
10	12.56	14.29	11.66	20.37	14.72	3.40

DENSIDAD (g/cm^3)

Profundidad (m)	P01	P02	P03	P04	Promedio	Desviación Estándar
1	1.66	1.61	1.60	1.50	1.59	0.06
2			1.01	1.08	1.04	0.03
3		1.32	1.26	1.29	1.29	0.02
4	1.23	1.09	1.11	1.01	1.11	0.08
5	1.02	0.99	1.13	1.08	1.05	0.05
6	1.06	0.98	1.18	1.10	1.08	0.07
7	1.03		1.07	1.06	1.05	0.02
8	1.17	1.01	1.12	1.39	1.17	0.14
9	1.11		1.12	1.13	1.12	0.01
10	1.07	1.04	1.53	1.03	1.17	0.21

Esfuerzo Vertical (kPa)

Profundidad (m)	P01	P02	P03	P04
1	16.30	15.82	15.69	14.69
2	16.30	15.82	25.56	25.25
3	16.30	28.75	37.90	37.90
4	28.39	39.45	48.76	47.80
5	38.39	49.17	59.80	58.37
6	48.83	58.75	71.34	69.11
7	58.94	58.75	81.79	79.53
8	70.44	68.67	92.80	93.20
9	81.30	68.67	103.81	104.24
10	91.82	78.91	118.85	114.35

Los valores de esfuerzo vertical se utilizaron para confinar las probetas del ensayo triaxial. Se obtuvo haciendo uso de los datos de densidad y el tamaño del estrato. Cabe mencionar que para las primeras probetas de triaxial se utilizó el valor de 50 kPa y 100 kPa para confinar las muestras puesto que no poseíamos el dato de densidad para el cálculo del esfuerzo vertical.

GRAVEDAD ESPECÍFICA

	Profundidad (m)	Contenido de ceniza (%)	Gravedad específica (Eq. 1)	Gravedad específica (Eq.2)
P01	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
	4	80.35	1.55	1.50
	5	66.17	1.69	1.63
	6	71.6985	1.63	1.58
	7	69.28	1.65	1.60
	8	81.03	1.55	1.50
	9	81.12	1.55	1.49
	10	77.96	1.57	1.52
P02	1	-	-	-
	2	60.24	1.75	1.70
	3	73.1	1.62	1.57
	4	83.89	1.52	1.47
	5	59.96	1.75	1.70
	6	89.47	1.48	1.43
	7	-	-	-
	8	66.42	1.68	1.63
	9	-	-	-

	10	-	-	-
	1	68.77	1.66	1.61
	2	83.77	1.52	1.47
	3	69.42	1.65	1.60
	4	89.81	1.48	1.42
	5	86.85	1.50	1.45
P03	6	86.92	1.50	1.45
	7	82.94	1.53	1.48
	8	78.66	1.57	1.52
	9	89.56	1.48	1.43
	10	80.04	1.56	1.50
	1	93.09	1.45	1.40
	2	83.08	1.53	1.48
	3	78.26	1.57	1.52
	4	86.01	1.51	1.45
	5	85.39	1.51	1.46
P04	6	85.47	1.51	1.46
	7	82.02	1.54	1.49
	8	79.49	1.56	1.51
	9	89.78	1.48	1.42
	10	83.66	1.52	1.47

ANEXO 3. TABLAS RESUMEN DE DATOS OBTENIDOS POR CORRELACIONES PROPIAS Y COMPARADOS CON LOS OBTENIDOS UTILIZANDO CORRELACIONES DE MARCHETTI.

MÓDULO DE DEFORMACIÓN RESTRINGIDO (MPa)

	Profundidad (m)	Id	ME Laboratorio (MPa)	Ed (MPa)	Kd	ME Marchetti (MPa)	ME Correlación (MPa)
P01	1	1.138	2.94068	3.78	14.46	8.34	0.791
	2	0.534		0.95	5.32	1.41	0.315
	3	0.352		0.76	3.34	0.83	0.296
	4	0.846		0.85	2.28	0.67	0.305
	5	0.392	0.13794	0.94	2.28	0.73	0.314
	6	0.268	0.37081	0.64	2.04	0.44	0.285
	7	0.28	0.43375	0.66	1.68	0.45	0.286
	8	0.302	0.76138	0.64	1.44	0.44	0.285
	9	1.3	0.5838	0.85	1.66	0.58	0.305
	10	0.31	0.82068	0.7	1.2	0.48	0.290
P02	1	1.564	6.203996	5.38	12.86	11.40	1.331
	2	0.53	0.99281	1.68	6.06	2.67	0.399
	3	0.652	0.23129	1.5	3.24	1.61	0.377
	4	0.484	0.24458	1.34	2.98	1.34	0.357
	5	0.558	0.30697	1.48	2.5	1.27	0.374
	6	0.506	0.88313	1.34	1.98	0.91	0.357
	7	0.63		1.48	1.6	1.01	0.374
	8	0.566	0.90416	1.38	1.42	0.94	0.362
	9	2.438		1.45	1.62	0.99	0.370
	10	0.5025		1.45	1.325	0.99	0.370
P03	1	1.46	1.89155	5.12	17.5	12.00	1.223
	2	0.622	0.32428	1.92	6.08	3.06	0.432
	3	0.728	0.12717	2	3.84	2.43	0.443
	4	0.71		2.06	3.18	2.18	0.452
	5	0.682		1.9	2.52	1.65	0.429
	6	0.706	0.09329	1.84	1.96	1.25	0.421
	7	0.678	0.12967	1.74	1.7	1.18	0.407
	8	1.272	0.42511	1.93	2.18	1.45	0.433
	9	1.054	0.45714	1.85	1.74	1.26	0.422
	10	0.624	0.57269	1.88	1.46	1.28	0.426
P04	1	1.664	2.56542	5.73	17.06	13.33	1.492
	2	0.572		2	6.32	3.25	0.443
	3	0.722		1.7	3.22	1.82	0.402
	4	0.606	0.09026	1.7	2.96	1.70	0.402
	5	0.774		1.57	2.9	1.55	0.385
	6	0.99	0.1618	2.63	2.14	1.94	0.544
	7	1.026	0.15063	2.45	1.24	1.67	0.513
	8	0.582	0.50733	1.97	1.68	1.34	0.439
	9	0.87333333		1.25	1.4	0.85	0.347
	10	1.065	0.8601	4.93	2.125	3.60	1.150

	CORTE NO DRENADO (kPa)				
	Profundidad (m)	Cu Laboratorio (kPa)	Cu Marchetti (kPa)	Cu Correlación 2 (kPa)	Cu Correlación (kPa)
P01	1	40.640	42.504	42.609	2.364
	2		12.179	12.281	2.947
	3		6.806	6.882	3.266
	4		5.810	5.882	3.918
	5	2.150	4.865	4.931	4.093
	6	5.370	4.375	4.437	4.334
	7	5.030	3.486	3.539	4.594
	8	13.040	3.121	3.172	5.161
	9	10.550	3.911	3.972	5.247
	10	12.560	2.690	2.736	5.815
P02	1	94.300	35.630	35.742	2.355
	2	15.360	13.911	14.017	2.780
	3	4.230	7.614	7.701	3.821
	4	6.110	7.180	7.265	4.074
	5	6.790	5.765	5.839	4.235
	6	19.690	4.307	4.369	4.459
	7		3.300	3.351	4.674
	8	13.030	2.858	2.905	4.824
	9		3.370	3.422	4.686
	10	14.290	2.678	2.723	5.005
P03	1	32.400	51.930	52.000	2.182
	2	6.520	26.964	27.169	5.362
	3	4.200	16.440	16.610	6.425
	4		13.398	13.551	6.910
	5		10.378	10.512	7.536
	6	3.350	7.952	8.066	8.356
	7	3.370	6.771	6.874	8.771
	8	8.350	5.645	5.736	9.398
	9	8.440	5.524	5.615	9.776
	10	11.660	6.731	6.839	10.906
P04	1	41.470	47.124	47.195	2.055
	2		28.645	28.856	5.381
	3	2.040	13.461	13.615	6.816
	4	4.130	12.149	12.294	6.963
	5		9.311	9.434	7.492
	6	4.630	4.562	4.638	8.767
	7	2.490	4.374	4.449	9.011
	8	9.450	7.076	7.184	9.327
	9		5.807	5.902	10.008
	10	20.370	9.855	9.992	9.195

DENSIDAD (g/cm^3)

	Profundidad (m)	Densidad laboratorio (g/cm^3)	Densidad Marchetti (g/cm^3)	Densidad Correlación (g/cm^3)
P01	1	1.66	1.95	1.39
	2		1.50	1.12
	3		1.50	1.03
	4	1.23	1.50	1.03
	5	1.02	1.50	1.05
	6	1.06	1.50	1.00
	7	1.03	1.50	1.00
	8	1.17	1.50	1.01
	9	1.11	1.50	1.08
	10	1.07	1.50	1.01
P02	1	1.61	1.60	1.58
	2		1.60	1.11
	3	1.32	1.60	1.17
	4	1.09	1.60	1.09
	5	0.99	1.60	1.13
	6	0.98	1.60	1.10
	7		1.60	1.16
	8	1.01	1.60	1.13
	9		1.60	1.11
	10	1.04	1.60	1.10
P03	1	1.60	1.60	1.54
	2	1.01	1.60	1.16
	3	1.26	1.60	1.18
	4	1.11	1.60	1.20
	5	1.13	1.60	1.18
	6	1.18	1.60	1.19
	7	1.07	1.60	1.18
	8	1.12	1.60	1.19
	9	1.12	1.60	1.18
	10	1.53	1.60	1.16
P04	1	1.50	1.60	1.53
	2	1.08	1.60	1.13
	3	1.29	1.60	1.20
	4	1.01	1.60	1.15
	5	1.08	1.60	1.22
	6	1.10	1.60	1.26
	7	1.06	1.60	1.34
	8	1.39	1.60	1.27
	9	1.13	1.60	1.27
	10	1.03	1.60	1.36