



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CORRELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS MASW y CBR PARA LA
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SUELO GRANULAR EN EL
SECTOR DE CHALLUABAMBA**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Civil

AUTOR: ÁNGEL LEODAN RAMON JARA

TUTOR: ING. ALFREDO VLADIMIR VÁZQUEZ ROURA, MSc.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ángel Leodan Ramon Jara con documento de identificación N° 1105947988, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de septiembre del 2023

Atentamente,



Ángel Leodan Ramon Jara

1105947988

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Ángel Leodan Ramon Jara con documento de identificación N° 1105947988, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico: “Correlación entre los métodos MASW y CBR para la evaluación de la resistencia de un suelo granular en el sector de Challuabamba”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de septiembre del 2023

Atentamente,



Ángel Leodan Ramon Jara

1105947988

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alfredo Vladimir Vázquez Roura con documento de identificación N° 0103464103, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **CORRELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS MASW y CBR PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SUELO GRANULAR EN EL SECTOR DE CHALLUABAMBA**, realizado por Ángel Leodan Ramon Jara con documento de identificación N° 1105947988, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de septiembre del 2023

Atentamente,



Alfredo Vladimir Vázquez Roura
0103464103

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mi madre María,
quien siempre vivirá en mi corazón, tu amor,
optimismo y paciencia perdurarán en mi vida

para siempre.

Ángel Ramón.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por su amor, comprensión y apoyo incondicional. En especial, a mis padres María y Carlos por ser mi fuente de inspiración y por brindarme su amor incondicional en todo momento; gracias por su apoyo, su paciencia, por sus palabras de aliento y por creer en mí. Gracias por estar siempre ahí. A mis herman@s Criss, Enma y Carlos gracias por todo.

También, quiero agradecer a mi tutor, Ing. Alfredo Vázquez, por su dedicación, paciencia y valiosos consejos y ayuda en cada etapa de la investigación. Su guía y apoyo fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.

Doy gracias a mis profesores, y en especial al Ing. Christian Mera, quienes me brindaron sus conocimientos y enseñanzas durante mi carrera universitaria, las cuales fueron esenciales para mí.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la empresa Geo&Geo por su valiosa contribución y apoyo en el desarrollo de mi trabajo. Su colaboración ha sido fundamental para el éxito de mi investigación y ha enriquecido significativamente mi trabajo. A todos que conforman esta empresa, mis más sinceros agradecimientos.

También, a mi compañera y pareja Elinor, que en todo momento estuvo conmigo y de una u otra forma estuvo a mi lado ayudándome en lo que necesitaba.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo, gracias por su tiempo, dedicación y compromiso. Sin el apoyo de todas estas personas, este trabajo no habría sido posible.

¡Muchas gracias a todos!

Atentamente,
Ángel Ramón

Resumen

La correlación entre el Índice de Soporte California (CBR) y la técnica de Ondas Superficiales de Microtremor (MASW) en la evaluación de la resistencia del suelo granular ha sido objeto de investigación en el campo de la ingeniería geotécnica. En el presente trabajo se establece una correlación directa entre el CBR y los parámetros obtenidos mediante el MASW, con el fin de mejorar la eficiencia y precisión en la evaluación de la resistencia de un suelo tipo granular, específicamente en el sector Challuabamba.

Para cumplir dicho objetivo, se planteó la siguiente pregunta: ¿Los resultados se podrán correlacionar entre el método MASW y CBR para suelos granulares? Para esto, se tomó mediciones de CBR y MASW en una muestra representativa de suelo del lugar especificado, se recopilaron datos geotécnicos y geofísicos para su análisis estadístico. La metodología empleada fue de tipo investigación experimental y correlacional, que se basa en experimentar y correlacionar los valores de CBR y MASW.

Los resultados indicaron una correlación significativa entre los valores del CBR y los parámetros derivados del MASW. Se observó una relación directa entre el CBR y la velocidad de propagación de las ondas de corte medida por el MASW. La correlación establecida entre el CBR y el MASW permitió estimar de manera confiable la resistencia del suelo granular utilizando únicamente técnicas geofísicas. Esto ofrece ventajas significativas en términos de tiempo y costos en comparación con los ensayos de laboratorio tradicionales. Además, se encontró consistencia en los datos recopilados de diferentes sitios de estudio, respaldando la robustez de la correlación establecida y su aplicabilidad en diversas condiciones geotécnicas. Sin embargo, se identificaron limitaciones relacionadas con las características específicas de los suelos granulares estudiados y la variabilidad inherente de las propiedades del suelo en diferentes condiciones geotécnicas. Se recomienda realizar estudios adicionales para ampliar la base de datos y fortalecer la correlación establecida, así como investigar la influencia de otros factores geotécnicos, como la densidad relativa y la gradación del suelo.

Palabras claves: CBR, MASW, suelo granular, correlación.

Abstract

The correlation between the California Bearing Ratio (CBR) and the Microtremor Surface Waves (MASW) technique in the evaluation of granular soil strength has been the subject of research in the field of geotechnical engineering. In the present work, a direct correlation between the CBR and the parameters obtained by MASW is established in order to improve the efficiency and accuracy in the evaluation of the strength of a granular soil, specifically in the Challuabamba sector.

To meet this objective, the following question was posed: Can the results be correlated between the MASW method and CBR for granular soils? For this, CBR and MASW measurements were taken on a representative sample of soil from the specified site, geotechnical and geophysical data were collected for statistical analysis. The methodology employed was experimental and correlational research type, which is based on experimenting and correlating CBR and MASW values.

The results indicated a significant correlation between CBR values and MASW derived parameters. A direct relationship was observed between the CBR and the shear wave propagation velocity measured by MASW. The correlation established between CBR and MASW allowed reliable estimation of granular soil strength using only geophysical techniques. This offers significant advantages in terms of time and cost compared to traditional laboratory testing. In addition, consistency was found in the data collected from different study sites, supporting the robustness of the established correlation and its applicability in various geotechnical conditions. However, limitations related to the specific characteristics of the granular soils studied and the inherent variability of soil properties under different geotechnical conditions were identified. Further studies are recommended to expand the database and strengthen the established correlation, as well as to investigate the influence of other geotechnical factors, such as relative density and soil gradation.

Key words: CBR, MASW, granular soil, correlation.

Índice

Portada

Certificado de responsabilidad y autoría **I**

Certificado de cesión de derechos de autor **II**

Certificado de dirección del trabajo de titulación. **III**

Dedicatoria **IV**

Agradecimientos **V**

Resumen **VI**

Abstract **VII**

1. Problema de estudio. 1

1.1. Introducción 1

1.2. Antecedentes 2

1.3. Descripción del problema 3

1.4. Importancia 3

1.5. Delimitación 4

1.5.1. Espacial o geográfica 4

1.5.2. Temporal 5

1.5.3. Sectorial o institucional 5

1.5.4. Problema General 5

1.5.5. Problemas Específicos 5

2. Justificación 6

3. Objetivos 6

3.1. Objetivo General 6

3.2. Objetivos Específicos 7

4. Hipótesis 7

4.1. Hipótesis General 7

5. Marco Teórico	8
5.1. Suelos granulares	8
5.2. Consistencia del suelo	8
5.2.1. Límite líquido (LL)	9
5.2.2. Límite plástico (LP)	9
5.2.3. Índice de plasticidad (IP)	9
5.3. Clasificación de suelo	10
5.3.1. Granulometría	10
5.3.2. Clasificación AASHTO	10
5.3.3. Clasificación SUCS	13
5.4. Proctor estándar	14
5.5. CBR	16
5.5.1. Capacidad de carga relativa.	16
5.5.2. Densidad óptima de compactación	16
5.5.3. Valores de CBR	16
5.6. MASW	16
5.6.1. Beneficios	17
6. Marco metodológico	19
6.1. Muestra	19
6.2. Materiales y equipos.	21
6.2.1. Materiales y equipos para MASW.	21
6.2.2. Granulometría.	22
6.2.3. Límites de Atterberg.	23
6.2.4. Ensayo de proctor.	25
6.2.5. Ensayo de CBR.	25
6.3. Procedimiento.	26
6.3.1. Límite plástico	26
6.3.2. Límite líquido	27
6.3.3. Granulometría	27
6.3.4. Ensayo de Proctor	28
6.3.5. Ensayo CBR	29
6.3.6. Procedimiento para MASW	30
6.4. Procedimiento general	32

7. Resultados	34
7.1. Resultados de ensayos complementarios	34
7.2. Análisis de resultados	40
7.3. Análisis de correlación	42
8. Conclusiones	43
9. Recomendaciones	44
Referencias	47
ANEXOS	48

Lista de Tablas

1.	Lugar de la obtención de las muestras	20
2.	Clasificación de suelos- Límites de Atterberg	34
3.	Humedad natural	34
4.	Granulometría	35
5.	Clasificación según la AASHTO	35
6.	Clasificación según SUCS	35
7.	Humedad óptima de compactación- Proctor	36
8.	Resultados de MASW	36
9.	Resultados de CBR	37

Lista de Figuras

1.	Lugar de ensayos	4
2.	Límites de Atterberg	8
3.	Clasificación de materiales de carreteras subrasantes	11
4.	Clasificación de materiales de carreteras subrasantes	12
5.	Carta de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7 . . .	13
6.	Carta de plasticidad: SUCS	14
7.	Especificaciones de la prueba de Proctor Estándar	15
8.	Lugar de toma de las muestras	20
9.	Equipos para MASW	21
10.	Equipo de MASW	22
11.	Tamices	23
12.	Cono de penetración	24
13.	Límite plástico	24
14.	Ensayo de proctor	25
15.	Ensayo CBR	26
16.	Adquisición de datos	31
17.	Resultados de MASW línea 1	38
18.	Resultados de MASW línea 2	39
19.	Resultados de MASW línea 3	40
20.	Resultados de correlación	42
21.	Resultados de límites de Atterberg de la calicata 1	49
22.	Resultados de límites de Atterberg de la calicata 2	50
23.	Resultados de límites de Atterberg de la calicata 3	51
24.	Granulometría de la calicata 1	52
25.	Granulometría de la calicata 2	53
26.	Granulometría de la calicata 3	54
27.	Proctor de la calicata 1	55
28.	Proctor de la calicata 2	56
29.	Proctor de la calicata 3	57
30.	Clasificación de la calicata 1	58
31.	Clasificación de la calicata 2	59
32.	Clasificación de la calicata 3	60
33.	Ensayo de límites de Atterberg	61

34.	Preparación de muestras	62
35.	Material lavado	63
36.	Secado de muestras	63
37.	Preparación de material	64
38.	Ensayo de proctor	65
39.	Preparación CBR	66
40.	Ensayo CBR	66
41.	Compactación de CBR	67
42.	Saturación CBR	68
43.	Secado de muestra	68
44.	Ensayo de ruptura— CBR	69
45.	Muestra luego de ensayar	70
46.	Línea MASW 1	71
47.	Línea MASW 2	72
48.	Línea MASW 2	73
49.	Línea MASW 3	74
50.	CBR 1	75
51.	Gráficas CBR 1.	76
52.	CBR 2	77
53.	Gráficas CBR 2	78
54.	CBR 3	79
55.	Gráficas CBR 3	80
56.	CBR 4	81
57.	Gráficas CBR 4	82
58.	CBR 5	83
59.	Gráficas CBR 5	84

1. Problema de estudio.

1.1. Introducción

La evaluación precisa de la resistencia de un suelo tipo granular es de vital importancia en la ingeniería geotécnica. Los suelos granulares, como la arena y la grava, son ampliamente utilizados en numerosas obras civiles. La capacidad portante de estos suelos es un parámetro crítico para garantizar la seguridad y el rendimiento de las estructuras sobre ellos. Actualmente, el CBR y la técnica de MASW son dos métodos ampliamente utilizados para evaluar la resistencia de este tipo de suelo. El CBR se basa en ensayos de laboratorio y mediciones in situ, mientras que el MASW permite caracterizar las propiedades mecánicas del suelo de forma no invasiva. Sin embargo, existe una necesidad de establecer una correlación directa entre estos dos métodos para mejorar la eficiencia y precisión de la evaluación de la resistencia del suelo.

La correlación entre el CBR y el MASW en suelos granulares presenta numerosas ventajas. Por un lado, el CBR es ampliamente utilizado debido a su simplicidad y relación bien establecida con la resistencia del suelo. Por otro lado, el MASW proporciona información detallada sobre las propiedades mecánicas del suelo en diferentes profundidades, sin la necesidad de realizar ensayos destructivos. La correlación entre ambos métodos podría permitir una evaluación más precisa y eficiente de la resistencia del suelo, ahorrando tiempo y costos asociados con ensayos de laboratorio adicionales.

A pesar de la importancia de la correlación entre el CBR y el MASW en suelos granulares, la investigación en este campo es limitada y existen vacíos de conocimiento. Actualmente, la mayoría de los estudios se centran en la correlación entre el MASW y otros parámetros geotécnicos, como la densidad o la velocidad de onda. Por lo tanto, existe una necesidad crítica de realizar investigaciones que se enfoquen específicamente en la correlación entre el CBR y el MASW para la evaluación de la resistencia del suelo granular.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal establecer una correlación directa y cuantitativa entre el CBR y los parámetros del MASW en suelos granulares. Se propone realizar mediciones de CBR y MASW en una muestra representativa de suelos granulares seleccionados, recopilando datos geotécnicos y geofísicos en paralelo. A través del análisis estadístico de estos datos, se buscará establecer una correlación confiable y aplicable en diferentes condiciones geotécnicas.

Se espera que los resultados de este estudio proporcionen a los ingenieros geotécnicos y profesionales de la construcción una herramienta valiosa para la evaluación de la resistencia

del suelo granular. La correlación establecida entre el CBR y el MASW permitirá una toma de decisiones más informada en el diseño.

1.2. Antecedentes

El análisis de la formación entre el Método de Análisis de Ondas de Superficie (MASW) y el Índice de Soporte California (CBR) para la evaluación de la resistencia del suelo en proyectos de ingeniería geotécnica es un tema de investigación relevante y actual de la ingeniería geotécnica. Existen varios estudios previos que han abordado esta temática.

Un trabajo de Wang, Xu, y Luo (2015) que llevaron a cabo un estudio para investigar la conexión entre el MASW y el CBR utilizando datos de campo y de laboratorio. El objetivo principal del trabajo fue evaluar la viabilidad y la eficacia del método de análisis de ondas de superficie en un entorno 3D y proporcionar pautas y recomendaciones para su aplicación práctica en exploraciones geofísicas. El estudio utiliza técnicas numéricas y modelos computacionales para simular y analizar el comportamiento de las ondas de superficie en un entorno 3D. Se investigan varios aspectos, como la propagación de las ondas de superficie, la resolución espacial y la sensibilidad a las propiedades del subsuelo. Los resultados del estudio indicaron que la topografía 3D distorsiona los resultados de las ondas Rayleigh.

C. Park (2013), quienes evaluaron la relación entre el MASW y el CBR en diferentes tipos de suelos. Los resultados del estudio mostraron que la coincidencia entre los dos métodos varía según el tipo de suelo, y para esto se recomienda realizar pruebas adicionales para determinar la resistencia del suelo en proyectos de ingeniería geotécnica, basándose en el ensayo que se vaya a realizar dependiendo de lo que se necesita conocer.

Anbazhagan, Parihar, y Rashmi (2012), ellos revisan las correlaciones existentes entre los valores N del ensayo de penetración estándar (SPT) y el módulo de corte, que es una propiedad geotécnica importante utilizada en la ingeniería geotécnica sísmica. Los autores generan una nueva conexión combinando nuevos datos obtenidos por el autor y datos antiguos disponibles.

de Barros da Silva, Núñez, Baptista, y Pires (2018) utilizaron el análisis de ondas superficiales en sus variantes pasiva y activa, junto con la refracción sísmica del terreno, para determinar parámetros dinámicos a partir de velocidades longitudinales y transversales obtenidas por métodos geofísicos. El estudio demuestra que la combinación de la refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) 2D proporciona una mayor continuidad en la caracterización geotécnica de dos suelos. Los resultados se comparan con los métodos tradicionales de ensayo geotécnico.

Gómez y Tobón (2017) realizaron una investigación con la finalidad de correlacionar geofísicas con parámetros geotécnicos. Algunos parámetros geotécnicos que se evaluaron fueron la compresión simple del material, la densidad, cohesión, ángulo de fricción; por parte de las geofísicas se tomaron valores de las velocidades V_s y V_p .

1.3. Descripción del problema

Existen bastantes dificultades cuando se está construyendo una vía, uno de ellos es el tiempo en realizar estudios de CBR, los mismos que pueden demorar hasta 4 días como mínimo, lo que conlleva a que los estudios por donde se está realizando la obra de ingeniería. Es por esto que nace la inquietud sobre la importancia de trabajar con geofísicas; estas son más rápidas y aportan buena información. Hasta ahora, no es común encontrar correlaciones entre estos dos métodos, debido a la complejidad que abarca, y también porque se tiene diferentes variedades de suelos.

1.4. Importancia

Su importancia radica en mejorar la precisión y confiabilidad de las evaluaciones de resistencia del suelo en proyectos de ingeniería geotécnica. El uso de diferentes métodos para evaluar la resistencia del suelo, como el MASW y el CBR, es común en la ingeniería geotécnica, pero las relaciones entre ellos no siempre están claras. Esto puede llevar a confusiones ya resultados inadecuados, lo que podría poner en peligro la estabilidad y la seguridad de la estructura construida.

Proporcionar información valiosa con información que ayude a tomar decisiones más precisas y estudios confiables en cuanto a la evaluación de la resistencia del suelo en proyectos de ingeniería geotécnica. Los resultados de este estudio pueden mejorar la seguridad y estabilidad de las estructuras y cimientos construidos sobre el suelo, lo que tiene implicaciones positivas para la sociedad en general.

En cuanto a los alcances, este estudio se enfocará en la correlación entre el MASW y el CBR para la evaluación de la resistencia del suelo en proyectos de ingeniería geotécnica. El estudio se llevará a cabo mediante pruebas de campo y de laboratorio, y se analizarán los datos obtenidos para determinar la coincidencia entre ambos métodos. Sin embargo, este estudio no pretende ser del todo y puede haber otros factores que puedan influir en la evaluación del suelo y que no se consideren en este estudio. Además, los resultados obtenidos solo serán aplicables a las condiciones geotécnicas y tipo de suelo especificado en el sitio de estudio

seleccionado, y no se podrán generalizar a todas las condiciones geotécnicas y tipos de suelo.

1.5. Delimitación

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

1.5.1. Espacial o geográfica

El lugar de estudio se encuentra en el barrio Challuabamba, parroquia Machangara del cantón Cuenca.

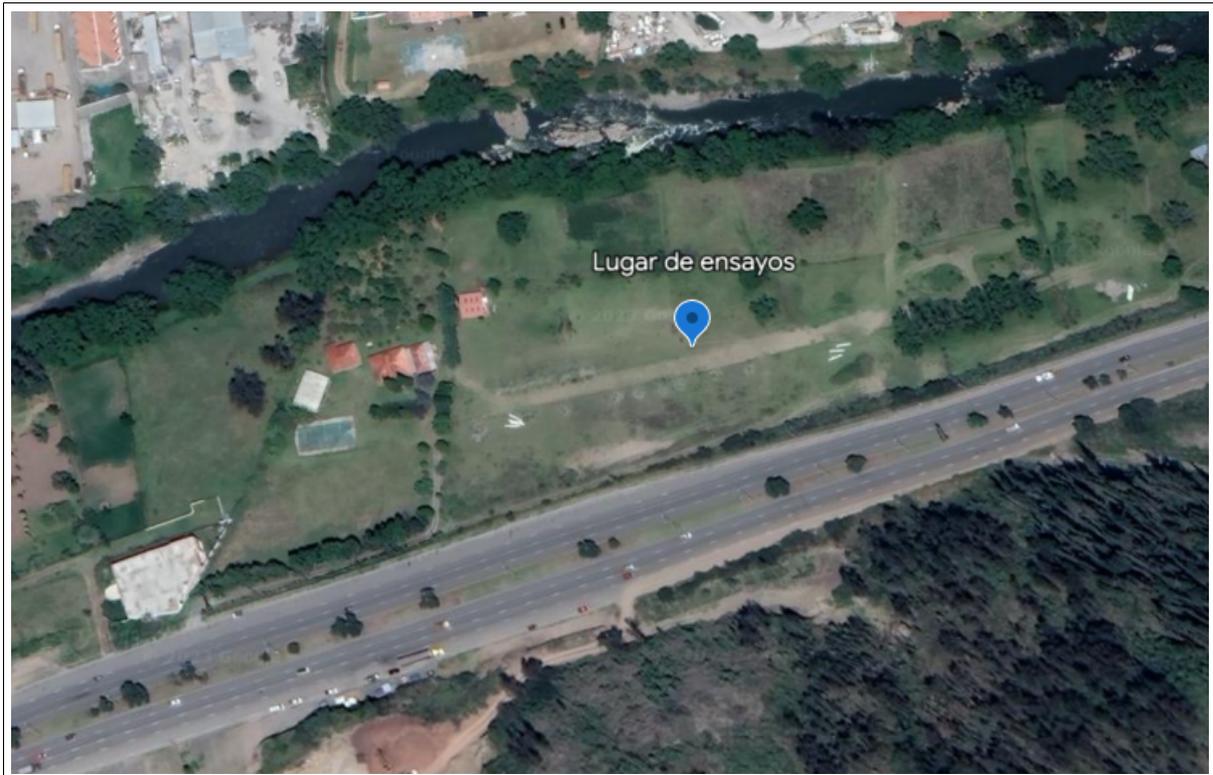
Se tiene las siguientes coordenadas:

Norte: $-78,8926349^{\circ}$

Este: $-2,8470664^{\circ}$

Figura 1

Lugar de estudio.



Nota: Lugar de estudio. **Fuente:** Obtenida de Google Earth.

1.5.2. Temporal

Se tiene como delimitación temporal el plazo en el que se va a desarrollar el trabajo de investigación, debido a que es un periodo de tiempo demasiado corto, iniciando al final del mes de marzo y teniendo como fecha límite inicios del mes de julio.

1.5.3. Sectorial o institucional

El presente trabajo se enfrenta a un desafío relacionado con la asignación de recursos financieros necesarios para llevar a cabo la investigación y los ensayos requeridos. Además, se identifica una carencia de implementos y equipos necesarios para la realización del ensayo MASW por parte de la institución universitaria. Esta falta de recursos tecnológicos representa un obstáculo significativo en el desarrollo del estudio porque impide la ejecución adecuada de las actividades planificadas y la obtención de resultados precisos y confiables. Para superar esta limitación, se estableció convenio con la empresa Geo&Geo para que puedan proporcionar los equipos y los recursos necesarios para llevar a cabo el ensayo MASW de manera satisfactoria.

1.5.4. Problema General

¿Es posible establecer una correlación entre el CBR y la velocidad de onda de corte (V_s) obtenida mediante el MASW en suelos granulares, con la finalidad de desarrollar una herramienta confiable para estimar la capacidad portante y características mecánicas de este tipo de suelos?

1.5.5. Problemas Específicos

- ¿Se podrá realizar pruebas de laboratorio para determinar los valores de CBR en muestras representativas de suelos granulares en el lugar de estudio?
- ¿Se podrá realizar ensayos de MASW para obtener los valores de velocidad de onda de corte (V_s) en el mismo lugar de extracción de las muestras utilizadas para el ensayo de CBR?
- ¿Se podrá analizar y comparar los resultados de CBR y MASW para identificar posibles correlaciones y tendencias en los datos?

2. Justificación

Esta investigación nace con la necesidad de contar con métodos precisos y confiables para la evaluación de la resistencia de un suelo, en este caso el suelo granular, ya que estos son ampliamente utilizados en la construcción de estructuras y obras civiles. Se da casos que realizar ensayos como el CBR es un poco lento en comparación con la MASW.

Actualmente, tanto el CBR como el MASW son métodos comúnmente utilizados para evaluar la resistencia del suelo granular, pero existe una falta de estudios que correlacionen directamente los resultados obtenidos mediante ambos métodos. La correlación entre el CBR, que se basa en ensayos de laboratorio y mediciones in situ, y el MASW, que permite caracterizar las propiedades mecánicas del suelo de forma no invasiva, sería de gran utilidad para los encargados de realizar estudios.

Un punto muy importante es investigar herramientas que permitan reducir costos y tiempos al momento de realizar la evaluación geotécnica de los suelos. En este caso entra el uso de diferentes métodos para evaluar la resistencia del suelo, como lo son el MASW y el CBR son comunes en ramas de la Ingeniería Civil; pero las conexiones entre ellos no siempre están claras. Esto puede llevar a confusiones y a resultados inadecuados en la evaluación de la resistencia del suelo.

Además, esta investigación cuenta con beneficios potenciales tanto a nivel técnico como económico. La correlación facilitará la selección adecuada de materiales granulares en proyectos de construcción, optimizando los diseños y reduciendo los costos asociados con pruebas de laboratorio adicionales. En términos de viabilidad, se cuenta con acceso a sitios de estudio con suelos granulares representativos y se utilizarán equipos y software especializados para la realización de las mediciones y el análisis de datos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Establecer una correlación entre el CBR y la velocidad de onda de corte (V_s) obtenida mediante el MASW en suelos granulares, con el propósito de desarrollar una herramienta confiable para estimar la capacidad portante y características mecánicas de este tipo de suelos.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar pruebas de laboratorio para determinar los valores de CBR en muestras representativas de suelos granulares en el lugar de estudio.
- Realizar ensayos de MASW para obtener los valores de velocidad de onda de corte (V_s) en el mismo lugar de extracción de las muestras utilizadas para el ensayo de CBR.
- Analizar y comparar los resultados de CBR y MASW para identificar posibles correlaciones y tendencias en los datos.

4. Hipótesis

4.1. Hipótesis General

- Los resultados de este trabajo van a ayudar a utilizar el MASW para la evaluación de la resistencia para suelos granulares, y de esa forma sustituir la forma convencional (CBR) para estos análisis.

5. Marco Teórico

5.1. Suelos granulares

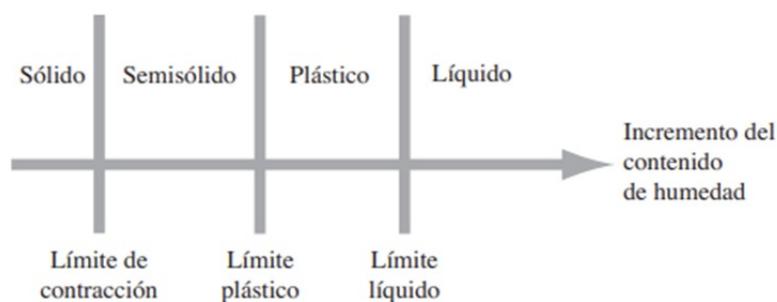
Son partículas de gran tamaño, como arena y grava, las cuales pueden variar en su forma, desde redondeadas y ligeramente desgastadas debido a la erosión, hasta parcialmente angulares con bordes suavizados y completamente angulares con bordes afilados. Según Pérez (2016) este tipo de suelos pueden experimentar cambios en la disposición de sus partículas o su densidad debido a procesos de compactación, los cuales están determinados por el módulo de compresibilidad y el ángulo de fricción interno entre las partículas

5.2. Consistencia del suelo

En el año 1900, un investigador sueco de nombre Albert Mauritz Atterberg creó un método para describir la consistencia de los suelos compuestos por partículas finas y con diferentes niveles de humedad. Según Braja (2013), cuando el suelo tiene un bajo contenido de humedad, exhibe características similares a las de un material sólido frágil. Sin embargo, cuando el contenido de humedad es elevado, tanto el suelo como el agua pueden fluir como si fueran un líquido.

Figura 2

Límites de Atterberg



Nota: La imagen representa los límites de Atterberg. **Fuente:** Braja (2013)

5.2.1. Límite líquido (LL)

El límite líquido es el contenido de humedad en el cual una muestra de suelo cambia de un estado plástico a un estado líquido. Es el contenido de agua en la muestra, en la que un cono de penetración puede ingresar 20 mm en la muestra. Se expresa como un porcentaje. Según Bowles (1981), el límite líquido se refiere al máximo porcentaje de humedad que puede tener un suelo para que pueda ser moldeado y exhiba comportamiento plástico.

5.2.2. Límite plástico (LP)

El límite plástico es el contenido de humedad en el cual una muestra de suelo cambia de un estado semisólido a un estado plástico. La práctica común es realizar “lombrices” de 3 mm de diámetro sin que se rompa. Como establece Badillo y Rodríguez (2005), el límite plástico se define como el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se considera no plástico, marcando la transición entre el estado plástico y el estado semisólido.

5.2.3. Índice de plasticidad (IP)

Según Angamarca (2013), el índice de plasticidad es un valor que indica el contenido de humedad en el cual un suelo se encuentra en estado plástico o semisólido. En algunos casos, suelos que parecen arcillas, pero son arenosos o finos, presentan dificultades al intentar determinar su límite plástico (LP) mediante el método de las lombrices, lo cual revela una falta de plasticidad. En estos suelos, el límite líquido (LL) resulta casi igual o incluso menor que el LP, lo que conduce a un índice de plasticidad negativo Pérez (2016).

El Índice Plástico no se podrá determinar en los siguientes casos según Manotoa (2016):

- Si no se puede determinar el límite líquido (LL) o el límite plástico (LP), se considera que el suelo no tiene plasticidad.
- En suelos muy arenosos, donde se determina el LP antes que el LL. Si no es posible realizar esta determinación, se considera que tanto el LL como el LP indican la ausencia de plasticidad.
- Cuando el LP es igual o mayor que el LL, lo cual indica la falta de plasticidad y se considera que el suelo no es plástico.

El índice de plasticidad (IP) se calcula mediante la resta del LL y el LP.

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

5.3. Clasificación de suelo

En geotecnia, se lleva a cabo un proceso conocido como clasificación de suelos, el cual consiste en categorizar y agrupar los suelos según sus características geotécnicas y propiedades relevantes. Los sistemas de clasificación de suelos en los que me baso son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, por sus siglas en inglés) y el Sistema de Clasificación de Suelos de la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés).

5.3.1. Granulometría

La granulometría se refiere a cómo se distribuyen los diferentes tamaños de partículas en una muestra de suelo. Esta característica es importante, ya que nos brinda detalles sobre la composición del suelo y la proporción de materiales como gravas, arenas y finos presentes en la muestra.

5.3.2. Clasificación AASHTO

El sistema de clasificación AASHTO clasifica los suelos en dos categorías principales: material granular y material limo-arcilloso. El material granular se subdivide en tres grupos (A-1, A-2 y A-3), mientras que el suelo limo-arcilloso puede subdividirse en cuatro grupos (A-4, A-5, A-6 y A-7).

En el caso de los suelos A-1, A-2 y A-7, se realiza una subdivisión adicional basada en el porcentaje que pasa por el tamiz #200, el Índice de grupo, el Límite Líquido y el Índice de Plasticidad.

El proceso de clasificación consiste en identificar la categoría que cumpla con los requisitos del suelo, considerando los valores de granulometría y los límites de consistencia en el siguiente orden de prioridad:

- Porcentaje que pasa el Tamiz #200
- Índice de Grupo (IG)
- Porcentajes que pasan los tamices: #10, #40 y #200
- Límite Líquido (LL)
- Índice Plástico (IP)

Las figuras 3 y 4 detallan la clasificación según la AASHTO.

Figura 3

Clasificación de materiales de carreteras subrasantes

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Nota: La imagen nos indica la clasificación del sistema AASHTO. **Fuente:** Braja (2013)

Figura 4

Clasificación de materiales de carreteras subrasantes

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
<i>Grupo de clasificación</i>	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes				
	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante			Regular a malo	

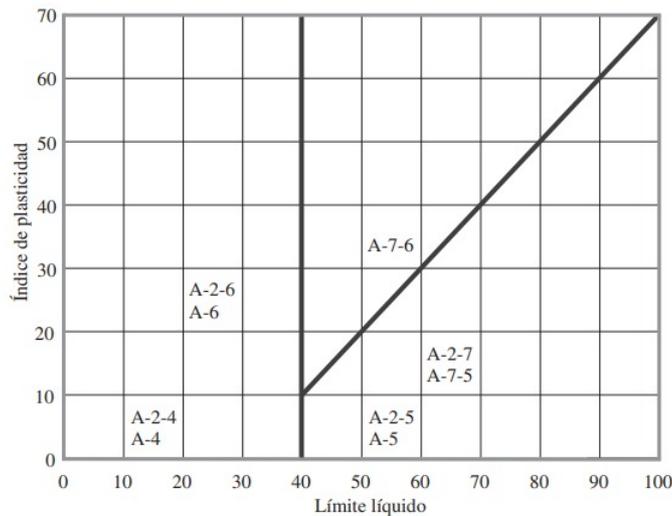
*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Nota: La imagen nos indica la clasificación del sistema AASHTO. **Fuente:** Braja (2013)

Figura 5

Carta de plasticidad para suelos en los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7



Nota: Representa la carta de plasticidad para los suelos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7. **Fuente:** Braja (2013)

5.3.3. Clasificación SUCS

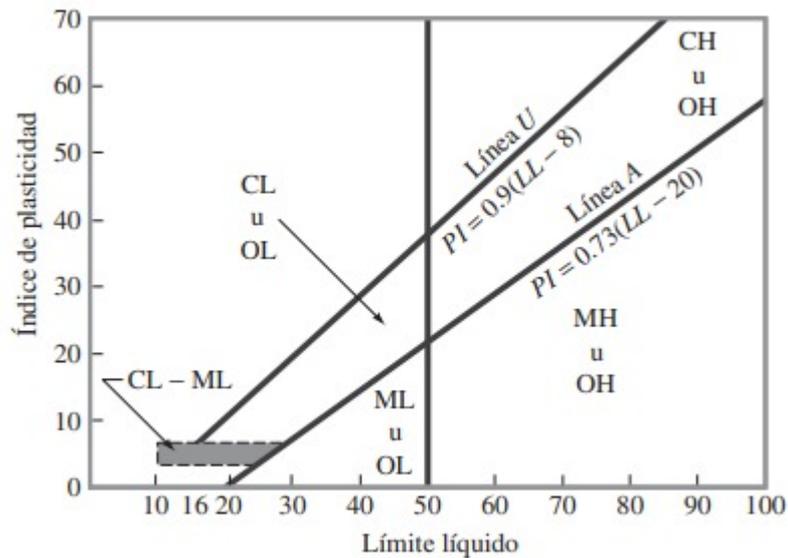
- Según Braja (2013), para el sistema de clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), los suelos de grano grueso que consisten en grava y arena en su estado natural, con menos del 50% que pasa a través del tamiz núm. 200, también se clasifican utilizando símbolos de grupo que comienzan con un prefijo de G o S. En este caso, el prefijo "G" se utiliza para suelos de grava o grava, mientras que el prefijo "S" se utiliza para suelos de arena o suelos arenosos.
- Según Braja (2013), los suelos de grano fino que tienen un 50% o más que pasa por el tamiz núm. 200 se clasifican utilizando símbolos de grupo que comienzan con un prefijo de M, C, O o Pt. El prefijo "M" se utiliza para el limo inorgánico, el prefijo "C" se utiliza para la arcilla inorgánica, el prefijo "O" se utiliza para los limos orgánicos y las arcillas orgánicas, y el símbolo "Pt" se utiliza para la turba, el lodo y otros suelos altamente orgánicos.

Según Braja (2013) existen otros símbolos como:

- W: bien clasificado
- P: mal clasificado
- L: baja plasticidad (límite líquido menor de 50)
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor de 50)

Figura 6

Carta de plasticidad



Nota: Se presenta la gráfica de plasticidad en la que se basa el método de SUCS. **Fuente:** Braja (2013)

5.4. Proctor estándar

Según Braja (2013), el ensayo de proctor estándar se realiza con un molde de diámetro de 101.6mm y un volumen de 943.3 cm³ y se compacta con un martillo de 24.4 N(masa <2.5kg), además tiene una caída de 30.48cm; para cada prueba, el contenido de humedad del suelo compactado es determinado en el laboratorio; si se conoce el contenido de humedad, el peso unitario seco γ_d puede calcularse como:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}} \quad (2)$$

Donde:

γ_d es el peso unitario seco.

γ es el peso unitario húmedo.

$w(\%)$ es el contenido de humedad.

Según Braja (2013), los valores de γ_d , que representan el peso unitario seco máximo, y el contenido de humedad óptimo para un suelo se pueden determinar a partir de la ecuación mencionada. Estos valores pueden ser representados gráficamente en relación con los contenidos de humedad correspondientes. Esta representación gráfica nos permite obtener información sobre el peso unitario seco máximo y el contenido de humedad óptimo del suelo.

Figura 7

Especificaciones de la prueba de Proctor Estándar

Elemento	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del martillo	24.4 N	24.4 N	24.4 N
Altura de la caída del martillo	304.8 mm	304.8 mm	304.8 mm
Número de golpes de martillo por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	591.3 kN-m/m ³	591.3 kN-m/m ³	591.3 kN-m/m ³
Suelo utilizado	Porción que pasa el tamiz núm. 4 (4.57 mm). Puede ser utilizada si 20% o menos del peso de material es retenido en el tamiz núm. 4	Porción que pasa el tamiz de 9.5 mm. Puede utilizarse si el suelo retenido en el tamiz núm. 4 es más de 20% y 20% o menos del peso es retenido en el tamiz de 9.5 mm	Porción que pasa el tamiz de 19 mm. Puede utilizarse si más de 20% del material es retenido en el tamiz de 9.5 mm y menos de 30% del peso es retenido en el tamiz de 19 mm

Nota: La imagen explica las especificaciones para cada Metodo indicado para el ensayo de proctor estándar. **Fuente:** Braja (2013)

5.5. CBR

“El método de ensayo es para evaluar principalmente la resistencia de materiales, evaluando la resistencia de materiales de tamaño máximo de partículas menores de 3/4 pulg (19.0mm)” (ASTM, 2016).

5.5.1. Capacidad de carga relativa.

Se define como la relación entre la carga de prueba que puede soportar un suelo y la carga de prueba que puede soportar un suelo de referencia con las mismas condiciones de densidad, humedad y compactación. La capacidad de carga relativa se expresa como un porcentaje y se utiliza para estimar la capacidad de soporte del suelo en relación con el suelo de referencia.

5.5.2. Densidad óptima de compactación

La densidad óptima de compactación se refiere a la densidad máxima que se puede obtener al compactar un suelo a un contenido de humedad óptimo específico.

5.5.3. Valores de CBR

El valor del CBR también se utiliza para clasificar los suelos según su capacidad de carga relativa. Además, según Braja (2013) los suelos con valores más altos de CBR se consideran mejores para la construcción de estructuras y pavimentos.

5.6. MASW

Es un método geofísico no invasivo utilizado para determinar las propiedades del suelo. Se basa en la medición de las ondas superficiales que se propagan en la superficie terrestre, las cuales son por fuentes sísmicas, artificiales o naturales. Se puede obtener un perfil de velocidad de onda de corte del subsuelo. Este puede ser perfil utilizado para determinar la estructura geológica del subsuelo, identificar zonas de debilidad, evaluar la capacidad de carga del suelo.

Como menciona Ulloa (2015), el método empleado, según la disposición de sus equipos y el software utilizado, tiene la capacidad de registrar tanto la llegada de las ondas P como las ondas S. Esto permite definir diferencias de densidad entre estratos y, en el caso de los arreglos específicos para las ondas S, facilita la obtención de parámetros elastoplásticos, como la relación de Poisson y otros módulos dinámicos. La profundidad alcanzada durante el proceso de prospección se encuentra aproximadamente entre 1/3 y 1/2 de la longitud del

tendido de los geófonos en la superficie, dependiendo del método empleado en la prospección. Esta capacidad de exploración permite determinar espesores de las capas del subsuelo, sus buzamientos y las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en cada una de ellas.

Según Suárez (2017), se presentan dificultades inherentes al evaluar y distinguir la señal de ruido con solamente un par de receptores. Esto genera la necesidad de registrar disparos repetidos en varias configuraciones de campo para un lugar específico, lo que implica un aumento en el tiempo y el esfuerzo requeridos durante el proceso de adquisición de datos de campo.

M. R. X. J. Park C.B. (1999) menciona que esto se debe a que el método se basa en la propagación de ondas superficiales que viajan a lo largo de la superficie del suelo, lo que permite la medición de las propiedades elásticas del suelo en un rango de profundidades relativamente pequeño.

Además, Según Stan-Kłęczek y Mendecki (2016) menciona que permite obtener perfiles de velocidad de ondas de corte (V_s) con alta resolución y en profundidades de hasta varios metros.

También, se realizan registros utilizando doce o más geófonos dispuestos a diversas distancias desde una fuente impulsiva o vibratoria. Esta disposición garantiza una redundancia estadística que permite medir con precisión las velocidades de fase. Como menciona Louie (2001), el uso de datos multicanal posibilita reconocer y descartar las ondas Rayleigh no esenciales, lo que facilita un mejor filtrado del ruido y agiliza la recolección de información.

Como plantea Estrada (2008), el análisis y comprensión de los datos recopilados facilita la identificación de la configuración y profundidad de las formaciones geológicas, así como características geotécnicas de interés, tales como la morfología del subsuelo, el grado de compactación y fracturación de los materiales, la meteorización, las alteraciones en la porosidad, las constantes elásticas de los materiales y el nivel de saturación.

5.6.1. Beneficios

- “El MASW puede ser utilizado en diversas aplicaciones, tales como la caracterización de suelos para el diseño de cimentaciones, la evaluación de la capacidad de carga de suelos, la detección de cavidades y fallas geológicas, la evaluación de la susceptibilidad a la licuefacción, entre otros” (Socco y Strobbia, 2004).

Como menciona Gómez y Tobón (2017) se puede tener beneficios como:

- Es una técnica relativamente rápida y económica.

- El MASW permite la adquisición rápida de datos a lo largo de grandes extensiones del terreno en un período de tiempo relativamente corto.
- La técnica no requiere exploraciones intrusivas.
- Los datos recopilados con el MASW pueden ser procesados y analizados de manera rápida y eficiente utilizando software especializado, reduciendo así el tiempo y el costo de procesamiento.

6. Marco metodológico

El Proyecto “CORRELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS MASW y CBR PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA DE UN SUELO GRANULAR EN EL SECTOR DE CHALLUABAMBA” es de carácter experimental y se emplea los siguientes tipos de Investigación:

- **Investigación Experimental:** se considera Investigación Experimental debido a los ensayos in situ (MASW), como también los ensayos en laboratorio de: Granulometría, Límites de Atterberg, Compactación para Proctor y CBR para determinar y características las propiedades de las muestras extraídas.
- **Investigación Correlacional:** mediante los resultados de los ensayos in situ y laboratorio, se determinará correlaciones del CBR y las velocidades S obtenidas del MASW.
- **Enfoque cuantitativo:** debido a que parte de datos experimentales; como lo son los análisis de datos de las geofísicas realizadas, que se desarrollara partiendo de las distancias que se tiene de sus geófonos.
- **Enfoque descriptivo:** porque tratará de describir el proceso y los resultados obtenidos.
- Además, es de tipo básica debido a que tratara de establecer nuevos valores y datos para definir y correlacionar si un material es apto para CBR partiendo del procesamiento de MASW.

6.1. Muestra

Se extrajeron muestras en el lugar donde se van a realizar las geofísicas, esto con la finalidad de obtener datos con mejor información, que valide los dos parámetros iniciales a los que se va a evaluar.

Se presentan las coordenadas de las calicatas para la muestra de suelos.

Tabla 1

Lugar de la obtención de las muestras

Identificación	Norte	Este
P1	9685137	734331
P2	9685138	734330
P3	9685163	734442

Nota: Coordenadas de cada punto de extracción de las muestras. **Fuente:** Autoria propia

Figura 8

Lugar de toma de las muestras.



Nota: La fotografía pertenece al lugar en donde se tomo las muestras para los ensayos. **Fuente:** Autoria propia.

6.2. Materiales y equipos.

6.2.1. Materiales y equipos para MASW.

Para el ensayo de MASW se utilizó los siguientes instrumentos:

- Martillo 18 lb.
- Placa de acero.
- 24 Geófonos.
- Sistema de adquisición de datos: se utiliza para registrar los datos recopilados por el geófono.
- Software de procesamiento de datos: se utiliza para procesar los datos recopilados y generar los perfiles de velocidad de las ondas de superficie.

Figura 9

Equipos para MASW



Nota: La siguiente figura trata sobre los equipos utilizados para MASW. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 10

Equipo de MASW.



Nota: La siguiente figura es sobre el equipo utilizado para MASW. **Fuente:** Autoria propia.

6.2.2. Granulometría.

En la siguiente fase se presenta los materiales usados para el ensayo de granulometría, el mismo que se realizó con fines de clasificación. Para ello se presenta los tamices usados para este ensayo.

- Tamices 3/4, 3/8, 4, 10, 40, 200 y fondo.

Estos se usaron con la finalidad de clasificar los materiales según los métodos antes mencionados.

Figura 11

Tamices.



Nota: Tamices utilizados en el ensayo. **Fuente:** Autoria propia.

6.2.3. Límites de Atterberg.

En esta parte se presentará los instrumentos utilizados para realizar los límites de Atterberg. Esto con la finalidad de obtener los parámetros para la clasificación y caracterización del suelo.

Figura 12

Cono de penetración.



Nota: Cono de penetración para la realización del límite líquido. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 13

Límite plástico.



Nota: Muestras de la realización del límite plástico. **Fuente:** Autoria propia.

6.2.4. Ensayo de proctor.

En el siguiente figura se presenta los instrumentos para realizar el ensayo de proctor, el mismo que tiene como finalidad encontrar la densidad específica máxima y el porcentaje de cantidad de agua óptimo. En la Figura 7 se especifican los requisitos para el ensayo.

Figura 14

Ensayo de proctor.



Nota: Instrumentos para realizar el ensayo de proctor. **Fuente:** Geotecnia-Facil (2021).

6.2.5. Ensayo de CBR.

Para el ensayo sobre CBR, he tomado como referencia las especificaciones de la ASTM D1883.

Figura 15

Ensayo CBR.



Nota: Instrumentos para realizar el ensayo de CBR. **Fuente:** LCweb (2018).

6.3. Procedimiento.

6.3.1. Límite plástico

1. Preparación de la muestra:

Se tamizó con el tamiz # 40 y se obtuvo una muestra representativa del suelo que deseas analizar. Para el tamizado, se pudo reducir el tamaño de las partículas mediante la trituración.

2. Mezcla y humedecimiento:

Se tomó una porción de la muestra y se mezcla con agua hasta obtener una pasta homogénea. Se añadió agua gradualmente mientras se mezclaba hasta que la muestra adquirió una consistencia plástica.

3. Moldeado de la muestra:

Se moldeó el suelo hasta formar una “lombriz”, con un espesor de 3 mm.

4. Determinación del límite plástico:

Se registró el contenido de humedad correspondiente, el porcentaje de humedad se representa como el límite plástico.

6.3.2. Límite líquido

1. Preparación de la muestra:

Se tamizó con el tamiz # 40 y se obtuvo una muestra representativa del suelo que desea analizar. Para el tamizado, se redujo el tamaño de las partículas mediante la trituración.

2. Mezcla y humedecimiento:

Se tomó una porción de la muestra y se mezcla con agua hasta que se obtuvo una pasta homogénea. Se añadió agua gradualmente mientras se mezclaba hasta que la muestra adquirió una consistencia plástica.

3. Moldeado de la muestra:

Se formó la muestra en forma de una bola utilizando las manos o un molde estándar.

4. Procedimiento del cono de penetración:

Se colocó la muestra en el recipiente propio del cono de penetración, asegurándose de que estuviera bien distribuida y nivelada. Luego, se dejó caer el cono de penetración verticalmente y con su propio peso. Se registró la profundidad de penetración del cono en la muestra. Se obtuvo 20 mm y se calculó la humedad; se reportó la humedad obtenida. Hubo casos que se repitieron el ensayo debido a que no se pudo obtener la penetración especificada.

6.3.3. Granulometría

1. Preparación de la muestra:

Se obtuvo una muestra representativa del suelo que se va a analizar. En este caso, se utilizó el método de lavado del material con la finalidad de separar las partículas finas de los materiales más gruesos.

2. Selección y colocación de tamices:

Se elige los tamices adecuados para el rango de tamaños de partículas que desea analizar, en este caso se utilizó los tamices de diámetros 4, 10, 40 y 200. Se colocó los tamices con

aberturas de malla más pequeños desde la parte inferior hasta la abertura más grande en la parte superior.

3. Tamizado de la muestra:

Se colocó la muestra de suelo en el tamiz superior, se tapó la pila de tamices. Se agitó la pila de tamices de manera lateral y vertical durante un período de tiempo determinado para que permitiera que las partículas se separen y pasen a través de las aberturas de malla.

4. Recolección de las fracciones de suelo:

Se desmontó la pila de tamices y se examinó cada tamiz. Se retira cuidadosamente el suelo que se ha acumulado en cada tamiz y fue transferido a recipientes separados. Luego, se registró la masa o el porcentaje de suelo retenido en cada tamiz.

5. Análisis y procesamiento de los resultados:

Se calculó el porcentaje de suelo retenido en cada tamiz en relación con la masa total de la muestra original. Se graficó los resultados en forma de un gráfico de distribución granulométrica para visualizar la distribución de tamaños de partículas en la muestra de suelo.

Tanto, el límite líquido, límite plástico y el análisis granulométrico, nos ayudaron a determinar y clasificar el tipo de suelo conforme el sistema de clasificación AASHTO y SUCS

6.3.4. Ensayo de Proctor

1. Preparación de la muestra:

Se redujo el tamaño de las partículas mediante trituración; luego se realizó el tamizado y de acuerdo a las especificaciones de la Figura 7 se realiza con el material seleccionado. Para esto el material debe estar seco.

2. Preparación de la muestra para compactación:

Se tomó una cantidad de la muestra y se calculó un contenido de humedad y se realiza la compactación.

3. Determinación de la densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo:

Se repitió el proceso de compactación para diferentes contenidos de humedad, variando la cantidad de agua agregada a cada muestra. Para cada contenido de humedad, se calculó la densidad seca utilizando la fórmula según Braja (2013):

$$Densidad\ seca(g/cm^3) = \frac{Peso\ de\ la\ muestra\ (g)}{Volumen\ de\ la\ muestra\ (cm^3)} \quad (3)$$

4. Graficar densidad seca y el contenido de humedad:

Se graficó la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad y se determinó la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo.

6.3.5. Ensayo CBR

1. Preparación de la muestra:

Se secó la muestra en un horno a una temperatura constante para eliminar el exceso de humedad. Luego, con el resultado del proctor, se trabajó con la humedad óptima. La muestra tuvo que estar homogénea.

2. Preparación del molde:

Se utilizó un molde cilíndrico de acuerdo a la ASTM D1883. Se tomó el peso del molde; luego se colocó el disco espaciador y se tomó la altura del mismo.

3. Compactación de la muestra:

En este paso, la compactación fue guiada de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM D1883. Luego de compactar la muestra, se registró el peso.

4. Determinación del contenido de humedad:

Se extrajo una muestra del suelo que se usó para compactar y se determinó su contenido de humedad y se comparó con el contenido de humedad resultante del ensayo de proctor.

5. Sumergir la muestra en agua:

Se sumergió en un tanque de agua y se colocó un dial para medir el hinchamiento que se tendrá de las muestras. Se dejaron en el agua por 96 horas y cada 24 horas se tomó lecturas del dial para obtener el hinchamiento de la muestra.

6. Ensayo de penetración:

Luego de 96 horas, se sacó la muestra y se trató de limpiar toda el agua sobrante y se tomó el peso de la muestra. Luego, se procedió a llevarle a la máquina para realizarle el ensayo de penetración aplicando una carga axial a la muestra y registrando la carga y la penetración correspondiente en incrementos especificados. Este ensayo está basado en las especificaciones de la ASTM D1883. Al final, se obtendrá los datos de las fuerzas aplicadas en los desplazamientos requeridos. También, se obtuvo la humedad presente en el suelo y luego se comparó con la humedad calculada de la muestra al momento que salió del tanque de agua.

7. Interpretación de resultados:

Se registró los datos del ensayo, se calculó el porcentaje de CBR a 0.1 plg. y 0.2 plg. de penetración para las muestras. Se calculó el valor del CBR para la muestras.

6.3.6. Procedimiento para MASW

1. Configuración del equipo:

Se preparó el equipo necesario, que incluyó un martillo o una fuente de energía vibratoria, geófonos (sensores), un sistema de adquisición de datos y un dispositivo de impacto para generar ondas superficiales. Coloque los geófonos en una línea a lo largo de la superficie del suelo con espaciados uniformes. Es recomendable utilizar al menos 24 geófonos para obtener una buena resolución.

2. Adquisición de datos:

Se golpeó la placa con el martillo en un punto cerca de los geófonos. Se registraron las ondas superficiales generadas por el impacto a medida que se propagan a través del subsuelo y son capturadas por los geófonos. Se realizó varias adquisiciones en diferentes puntos a lo largo de la línea para obtener suficientes datos para el análisis.

Figura 16

Adquisición de datos.



Nota: Colocación de geófonos en campo. **Fuente:** Autoria propia.

3. Procesamiento de datos:

Se procesaron los datos de campo para eliminar el ruido y mejorar la calidad de la señal. Se realizó la transformada de Fourier para obtener el espectro de frecuencia de las ondas superficiales registradas.

Se aplicó técnicas de filtrado y apilado para aumentar la relación señal-ruido para mejorar la resolución de las curvas de dispersión.

4. Análisis de dispersiones:

Se identificó las curvas de dispersión a partir de los datos procesados. Estas curvas representan la relación entre la velocidad de fase de las ondas superficiales y la frecuencia. Se extrajeron las curvas de dispersión dominantes y se determinaron los modos de propagación de las ondas superficiales en el subsuelo.

Se correlacionaron las curvas de dispersión con las propiedades del suelo, como las velocidades de corte (V_s), para obtener información sobre la estructura del subsuelo.

5. Inversión del modelo:

Se utilizaron las curvas de dispersión obtenidas para realizar la inversión del modelo, que consistía en ajustar un modelo teórico a los datos observados. Se estimaron las velocidades de corte (V_s) y las profundidades de las capas del suelo en función de las curvas de dispersión y otros parámetros del modelo.

6. Interpretación y presentación de los resultados:

Se interpretaron los resultados obtenidos, que incluyeron perfiles de velocidad de corte (V_s) y las profundidades de las capas del suelo. Además, se presentaron los resultados en forma de gráficos, perfiles o mapas para visualizar la estructura del subsuelo y las propiedades del suelo.

6.4. Procedimiento general

1. Se calculó el límite líquido y plástico
2. También se realizó la granulometría, esto con la finalidad de obtener el porcentaje de cada tipo de material que se tuvo en el tipo de suelo de estudio.
3. Tanto con los límites de Atterberg y la granulometría, se obtuvo el resultado sobre el tipo de suelo en el que se trabajó.

4. Se realizó el ensayo de proctor, con la finalidad de obtener cuál es la humedad y la densidad óptima del suelo.
5. Basado en el paso anterior, se realizó el ensayo de CBR. Se obtuvo los resultados que se usaran posteriormente para la correlación.
6. Se realizó el sondeo con MASW en campo, posteriormente se obtiene las velocidades V_s del suelo.
7. Se correlacionó los valores de CBR y las velocidades V_s obtenidas de MASW.

7. Resultados

7.1. Resultados de ensayos complementarios

Tabla 2

Límites de Atterberg

N° de muestra	Límite Plástico (%)	Límite Líquido (%)
1	23.6	26.1
2	24.1	25.8
3	22.9	26.5

Nota: Se presentan los límites de Atterberg. **Fuente:** Autoria propia

Tabla 3

Humedad natural

N° de muestra	Humedad natural (%)
1	18.3
2	16.5
3	12.9

Nota: Se presenta la humedad natural del suelo. **Fuente:** Autoria propia

Tabla 4*Granulometría*

N° de muestra	Gravas(%)	Arenas(%)	Finos(%)
1	7.6	65.6	26.9
2	21.2	57.3	21.5
3	7.2	74.1	18.7

Nota: Se presenta la composición en las muestras extraídas. **Fuente:** Autoría propia

Tabla 5*Clasificación según la AASHTO*

N° de muestra	AASHTO
1	A-2-4(0)
2	A-2-4(0)
3	A-2-4(0)

Nota: Se presenta la clasificación de la AASHTO de las muestras extraídas. **Fuente:** Autoría propia

Tabla 6*Clasificación según SUCS*

N° de muestra	SUCS
1	SM- Arena limosa
2	SM- Arena limosa con grava
3	SM- Arena limosa

Nota: Se presenta la clasificación de la SUCS de las muestras extraídas. **Fuente:** Autoría propia

Tabla 7

Humedad óptima de compactación- Proctor

N° de muestra	Humedad óptima de compactación (%)
1	16.6
2	15.4
3	13.3

Nota: Se presenta la humedad óptima de compactación de las muestras extraídas. **Fuente:** Autoria propia

Tabla 8

Resultados de MASW

N° de muestra	Valores Vs
1	128
2	151
3	142

Nota: Se presenta los valores de Vs obtenidas de los ensayos MASW. **Fuente:** Autoria propia

Tabla 9*Resultados de CBR*

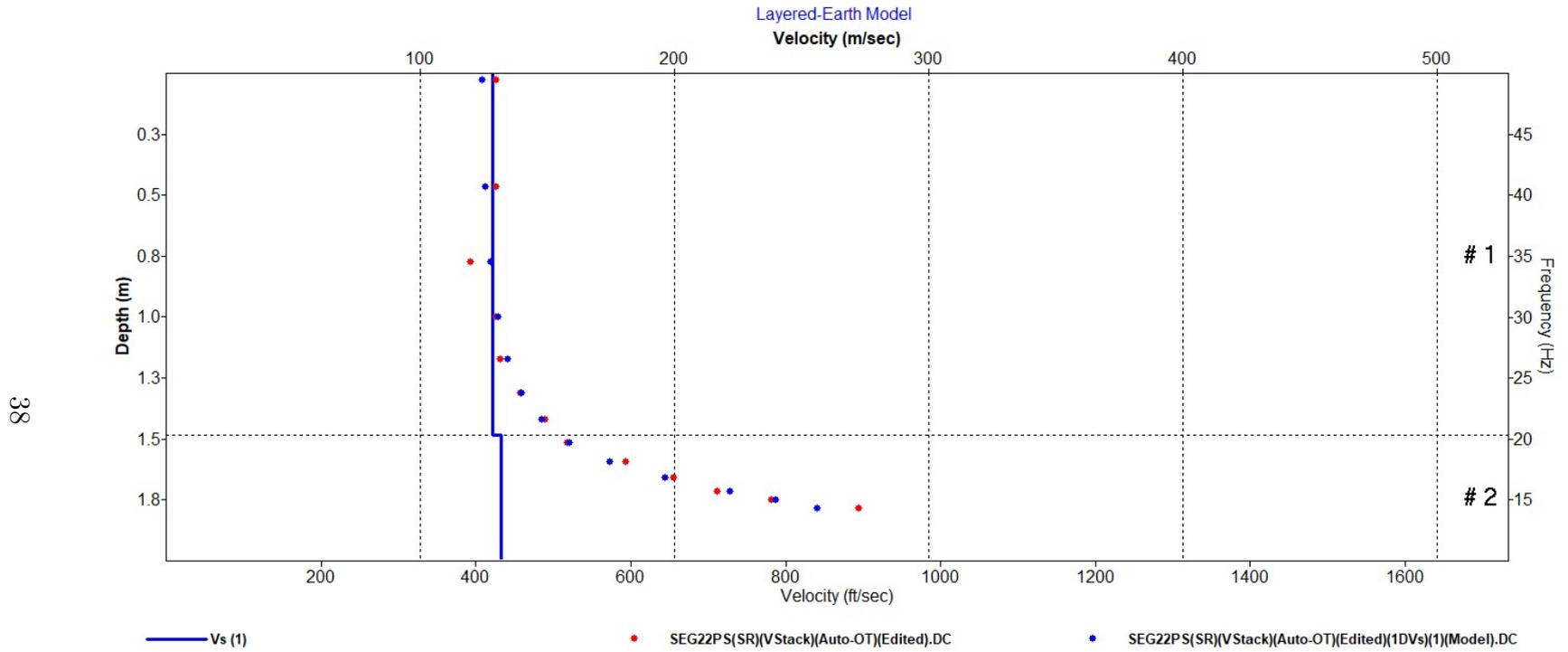
N° de ensayo	N° de muestra	Valor CBR
1	P1	11.2
2	P3	13.1
3	P3	14.4
4	P2	17.2
5	P2	17.4

Nota: Se presenta los resultados del CBR de las muestras extraídas. **Fuente:** Autoria propia

Para las figuras 17, 18 y 19 se interpretan de la siguiente forma: el eje de las abscisas conforma las velocidades V_s y el eje de las coordenadas comprende a la profundidad en metros (m). En el caso de la figura 17 y 18, la parte superior representa a las velocidades en m/s y en la parte inferior las velocidades están en las unidades ft/s. Para el caso de la figura 19, tanto la parte superior e inferior están en las unidades de sistema internacional (m/s). (**Nota:** m/s equivale a metros/segundos y en el caso ft/s es pies/segundos)

Figura 17

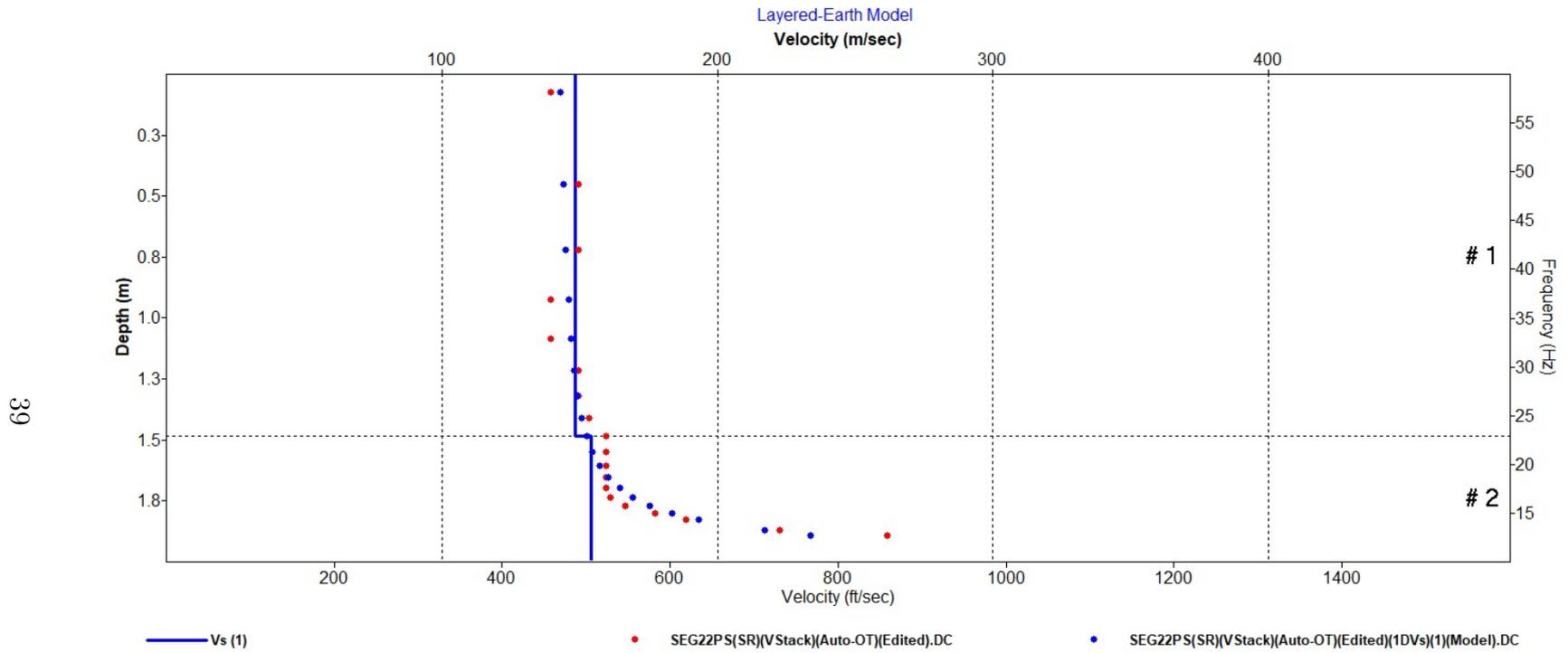
Resultados de MASW línea 1



Nota: Se presenta el resultado de la MASW en la línea 1. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 18

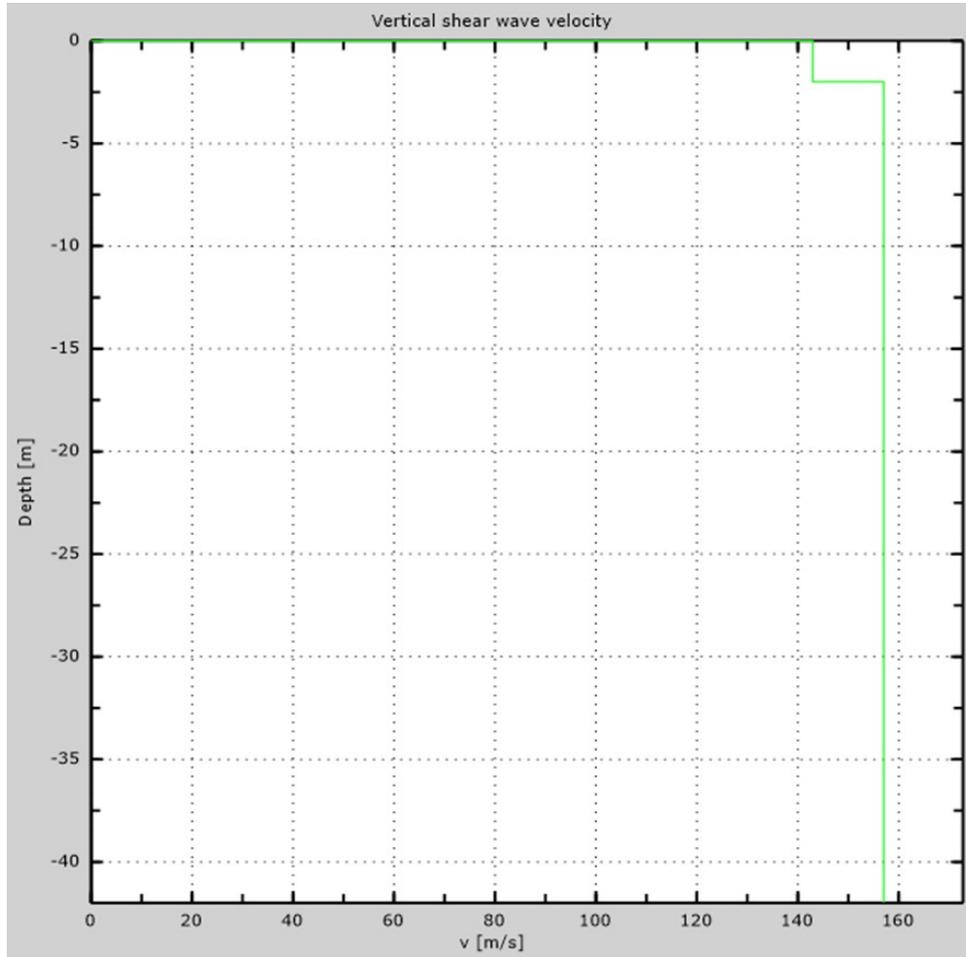
Resultados de MASW línea 2



Nota: Se presenta el resultado de la MASW en la línea 2. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 19

Resultados de MASW línea 3



Nota: Se presenta el resultado de la MASW en la línea 3. **Fuente:** Autoría propia.

7.2. Análisis de resultados

En esta sección, se analizará los datos obtenidos a partir de diversos ensayos realizados en estas muestras de suelo. Estos resultados son importantes para comprender algunos parámetros geotécnicos que se abordaron durante el proceso.

En la tabla 2 se presentan los límites de Atterberg, los mismos que son importantes al momento de evaluar el cambio volumétrico del suelo; además, influyen en su resistencia y capacidad portante.

En la tabla 3 se encuentran los resultados de la humedad natural, esta se realizó con la intención de tener una idea con qué porcentaje se encontraba el suelo al momento de realizar el MASW, debido a que puede haber variabilidad en la velocidad V_s .

En la tabla 4 se presentan los porcentajes de cada tipo de suelo presentes en las muestras de interés. En todas estas muestras se evidencia que las arenas predominan en las muestras; además, existe un porcentaje de gravas, esto nos ayudara a enfocar nuestro estudio a un tipo de suelo específico.

En la tabla 5 y 6 se presentan los resultados de la clasificación según el sistema AASHTO y SUCS respectivamente, los mismos que serán importantes para la interpretación de resultados.

En la tabla 7 se presentan los resultados de la humedad óptima de compactación de cada muestra, esto influirá directamente en el ensayo CBR; la humedad óptima de compactación permite alcanzar la densidad máxima y, por lo tanto, el CBR más alto posible para el suelo en estudio. Al alcanzar la humedad óptima durante la compactación, se asegura que el suelo tenga la máxima capacidad portante.

En la tabla 8 se encuentran los resultados de las velocidades V_s del ensayo MASW, estos valores V_s son importantes para la correlación debido a que serán un parámetro para la correlación planteada.

En la tabla 9 se presentan los resultados del CBR, los valores de CBR se presentan como el segundo parámetro para la correlación planteada.

La figura 17 muestra un perfil de velocidad de onda obtenido mediante el MASW en la línea 1. Se observa un cambio de velocidades a una profundidad de 1,5m, indicando un aumento en la rigidez del suelo en capas más profundas. Para el análisis, la velocidad que tome en este punto es la que tiene a 0,3m debido a que esa es la profundidad a la que se obtuvo la muestra para el análisis de CBR.

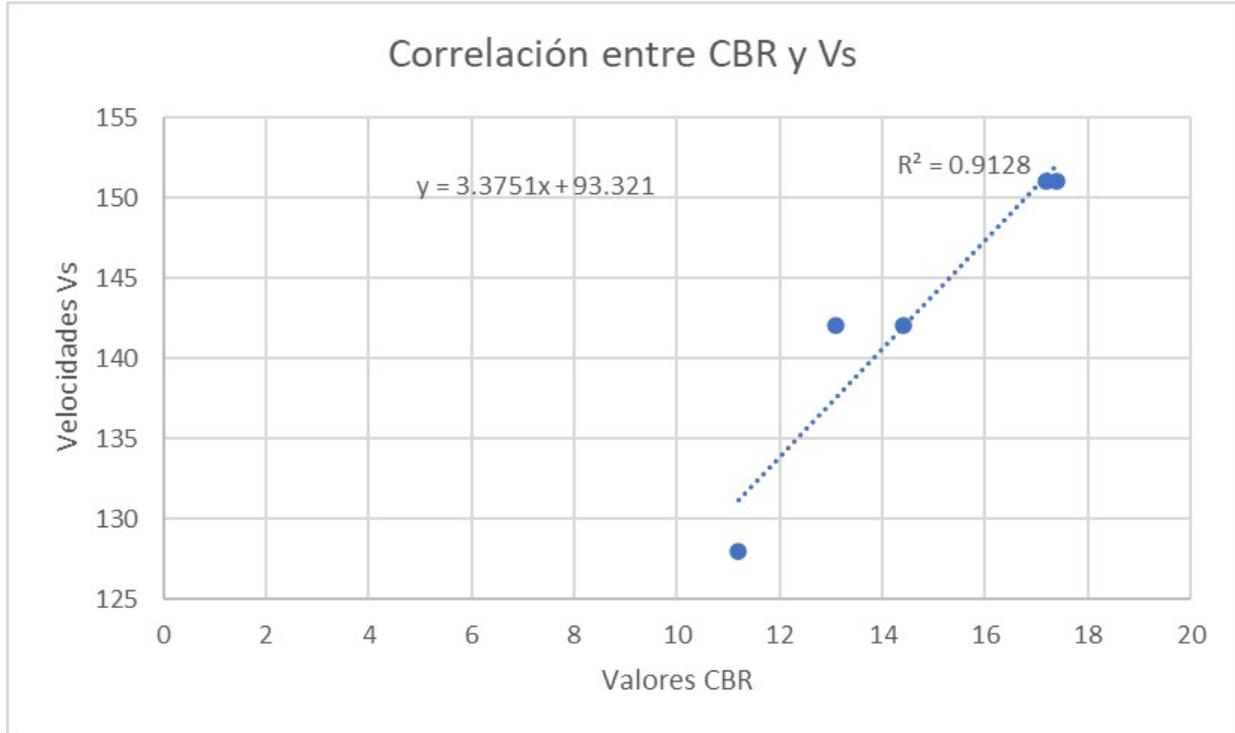
La figura 18 se muestra un perfil de velocidad de onda obtenido mediante el MASW en la línea 2. Se observa un cambio de velocidades a una profundidad de 1,5m (aunque no es tan significativo el cambio de estrato), indicando un aumento en la rigidez del suelo en capas más profundas. La profundidad que fue tomada para el análisis tanto de la velocidad V_s y CBR fue en los 0,65m.

La figura 19 se muestra un perfil de velocidad de onda obtenido mediante el MASW en la línea 3. Se observa un cambio de velocidades a una profundidad de 2.5m, esto nos indica un aumento en la rigidez del suelo en capas más profundas. Para el análisis de CBR y MASW, la profundidad tomada fue a 0.6m.

7.3. Análisis de correlación

Figura 20

Resultados de correlación



Nota: Eje de las abscisas son los valores de CBR y eje de las coordenadas es velocidades Vs.
Fuente: Autoría propia.

Los resultados de todas las líneas sísmicas tienen valores de velocidad Vs entre 128 m/s hasta 151 m/s; y de igual forma los valores de CBR se encuentran en valores desde 11% hasta 17%.

Además, en la figura 20 se presenta el resultado de la correlación entre los parámetros establecidos, los mismos que son el %CBR y la velocidad Vs; además, la correlación demostró ser significativa entre los valores del CBR y los parámetros obtenidos mediante el MASW. Los datos mostraron una relación directa entre el CBR y la velocidad de propagación de las ondas de corte (Vs) medida por el MASW. Esto indica que a medida que aumenta la resistencia del suelo granular, aumenta la velocidad de propagación de las ondas de corte.

Para esto, se obtuvo la siguiente fórmula para el cálculo del porcentaje de CBR en función

de las velocidades V_s :

$$\% \text{ del CBR} = \frac{V_s - 93.321}{3.3751} \quad (4)$$

Es importante destacar que la fórmula presentada para correlacionar el MASW y el CBR es válida solo para el tipo de suelo especificado. No es aplicable a otros tipos de suelos debido a la variabilidad de los parámetros en función de diversas características, como la composición del suelo, las condiciones de carga y la profundidad analizada. Es fundamental tener en cuenta estas limitaciones para evitar errores en la interpretación de los resultados.

A pesar de haber encontrado evidencias de una correlación positiva entre el MASW y el CBR para el tipo de suelo estudiado, se identificaron algunas limitaciones en la correlación establecida. Estas limitaciones pueden estar relacionadas con las características específicas de los suelos granulares analizados y la variabilidad inherente de las propiedades del suelo bajo diferentes condiciones geotécnicas. Es esencial considerar estas limitaciones y otros factores que puedan influir en los resultados al aplicar la correlación en futuros proyectos y estudios.

Por ejemplo, se observó que la correlación puede verse afectada por la variabilidad en la densidad relativa y la gradación del suelo granular. Estos factores pueden influir en la rigidez y la capacidad portante del suelo, lo que a su vez afecta la relación entre el MASW y el CBR. Por lo tanto, se requiere abordar estas limitaciones en futuras investigaciones y considerar otros factores que puedan influir en los resultados.

8. Conclusiones

En conclusión, la realización de pruebas de laboratorio para determinar los valores de CBR, combinada con los ensayos de campo de MASW para obtener los valores de velocidad de onda de corte (V_s), ha sido un componente fundamental en el estudio de correlación entre ambos métodos. Se seleccionaron como parámetros geotécnicos la velocidad V_s y el valor de CBR con el objetivo de establecer una correlación significativa y precisa entre ellos, reflejando así los valores obtenidos durante los ensayos mencionados.

Además, con los análisis y comparaciones detalladas de los resultados obtenidos a través de los ensayos de CBR y MASW se ha brindado una visión más profunda sobre la posible correlación entre ambos parámetros. Durante este proceso exhaustivo de evaluación, se ha podido identificar patrones consistentes y tendencias significativas en los datos. En particular, se ha observado una clara relación de correspondencia entre los valores de CBR y de V_s . Estas correlaciones han proporcionado evidencias sólidas de que la velocidad V_s puede estar

directamente relacionada con el CBR. Esto tiene implicaciones significativas, ya que sugiere que la velocidad V_s puede ser una medida relevante y útil para estimar la capacidad portante y el comportamiento mecánico de los suelos granulares. No obstante, es importante destacar que este resultado se ha realizado en el contexto específico de los suelos granulares y las condiciones geotécnicas estudiadas. Por lo tanto, es necesario ser cautelosos al aplicar esta correlación en otros tipos de suelos o en contextos geotécnicos diferentes, ya que los resultados pueden variar debido a las particularidades de cada suelo y sitio de estudio.

Basándome en los resultados obtenidos, se puede finalizar concluyendo que sí podría ser factible reemplazar la forma convencional de analizar la resistencia del suelo granular mediante el CBR, y sustituirlo con el método MASW. Sin embargo, esta sustitución debe realizarse teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente.

9. Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios adicionales para ampliar la base de datos y fortalecer la correlación establecida. Además, se sugiere investigar la influencia de otros factores geotécnicos, como la densidad relativa y la gradación del suelo, en la correlación entre el CBR y el MASW en suelos granulares.
- Para fortalecer la correlación establecida, es recomendable aumentar el tamaño de la muestra de suelos granulares utilizados en la investigación. Esto ayudará a abarcar una mayor diversidad de condiciones geotécnicas, incluyendo diferentes tipos de suelos granulares, rangos de densidad y variaciones en la gradación del suelo.

Entonces, la densidad del suelo granular impacta en su rigidez y resistencia, lo cual se refleja en velocidades de onda distintas. Por lo tanto, si hay variaciones en la densidad del suelo en un área determinada, la correlación entre el CBR y la velocidad de onda puede verse afectada. Así mismo, las variaciones en la gradación del suelo también tienen un papel importante, ya que influyen en el drenaje, compactación y estabilidad del suelo, lo cual puede afectar la velocidad de onda medida. Por consiguiente, diferentes gradaciones del suelo granular pueden presentar velocidades de onda diferentes para un mismo CBR, lo que dificulta establecer una correlación directa.

- Aunque la correlación entre el CBR y el MASW se ha demostrado prometedora, es importante investigar la influencia de los parámetros antes mencionados. Por ejemplo, se pueden analizar la densidad relativa, la permeabilidad y la resistencia al corte directo

del suelo granular para evaluar su impacto en la relación entre el CBR y los parámetros del MASW. Cuando la densidad relativa es alta, indica una estructura más compacta del suelo. Esta propiedad tiene un impacto en la permeabilidad y en la resistencia al corte de los suelos granulares. En los suelos granulares, la permeabilidad está determinada principalmente por el tamaño y forma de las partículas, así como por la estructura y compacidad del suelo. Los suelos granulares más sueltos suelen tener una mayor permeabilidad, ya que hay más espacio entre las partículas para que el agua fluya. Por el contrario, los suelos granulares densos presentan una permeabilidad más baja debido a la proximidad entre las partículas, lo que limita los espacios interconectados para el flujo de agua. La resistencia al corte se ve afectada por factores como la fricción entre las partículas y la cohesión si está presente. Tanto la densidad relativa como la permeabilidad del suelo granular tienen un impacto significativo en su resistencia al corte. Los suelos granulares más densos tienden a exhibir una mayor resistencia al corte debido a que las partículas están más cerca unas de otras, lo que aumenta la fricción entre ellas. Además, una menor permeabilidad en suelos granulares densos ayuda a mantener una distribución más efectiva de las tensiones y contribuye a una mayor resistencia al corte.

- Se recomienda realizar estudios comparativos entre la correlación establecida y otros métodos de evaluación de la resistencia del suelo granular, como ensayos de penetración estándar (SPT) o ensayos de placa estática. Esto ayudará a evaluar la eficacia y la aplicabilidad de la correlación propuesta en comparación con los métodos tradicionales.

Referencias

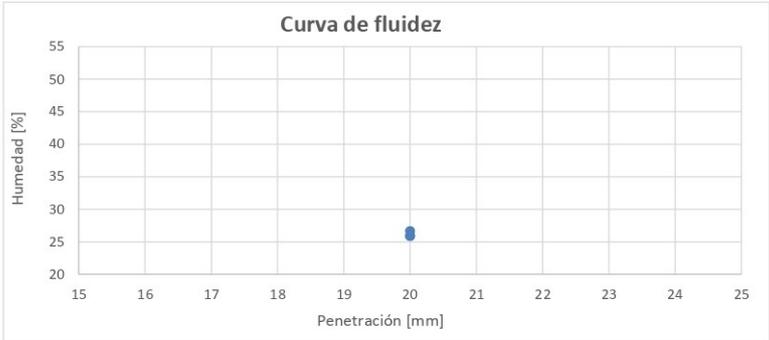
- Anbazhagan, P., Parihar, A., y Rashmi, H. N. (2012, 5). Review of correlations between spt n and shear modulus: A new correlation applicable to any region. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 52-69. doi: 10.1016/J.SOILDYN.2012.01.005
- Angamarca, A. (2013). *Determinación del cbr de laboratorio y natural en suelos finos y su correlación con el dcp para la determinación de la capacidad portante de la sub-rasante, en el diseño de pavimentos flexibles de la ciudad de quito* . Universidad Central del Ecuador.
- ASTM. (2016). *Astm d1883-16: Standard test method for cbr (california bearing ratio) of laboratory-compacted soils*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Badillo, J., y Rodríguez, R. (2005). *Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos*. Mexico: Limusa.
- Bowles, J. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. Mexico: McGRAW-HILL.
- Braja, D. (2013). *Fundamentals of geotechnical engineering* (Cuarta ed.). México: Cengage Learning Editores.
- de Barros da Silva, M. A. P., Núñez, H. M. F., Baptista, J. J., y Pires, G. J. P. T. (2018). *Procedimiento metodológico para aplicar la geofísica a estudios geotécnicos en la ciudad de luanda, angola*.
- Estrada, A. L. (2008). *Prospección sísmica para geólogos*. Universidad de Tucuman.
- Geotecnia-Facil. (2021). *Ensayo proctor normal y modificado. descripción e interpretación*. Descargado de <https://geotecniafacil.com/ensayo-proctor-normal-y-modificado/> (Fecha de acceso: 17 de junio de 2023)
- Gómez, R., y Tobón, (2017). *Correlaciones entre algunas variables geotécnicas y velocidades de onda compresiva (vp) y de corte (vs)*.
- LCweb. (2018). *Ensayo proctor normal y modificado. descripción e interpretación*. Descargado de https://www2.caminos.upm.es/departamentos/ict/lcweb/ensayos_suelos/cbr.html (Fecha de acceso: 17 de junio de 2023)
- Louie, J. N. (2001, 4). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 347-364. Descargado de <http://www.ce.memphis.edu/7137/PDFs/ReMi/1.%20refr.html>
- Manotoa, A. (2016). *Estudio de la correlación entre los ensayos (dcp) penetrómetro dinámico de cono y (cbr) relación de soporte de california en los diferentes tipos de suelos* . Universidad Técnica de Ambato.

- Park, C. (2013, 6). Masw for geotechnical site investigation. *The Leading Edge*, 32, 656-662. Descargado de <https://doi.org/10.1190/tle32060656.1> doi: 10.1190/tle32060656.1
- Park, M. R. X. J., C.B. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64, 800-808.
- Pérez, R. (2016). Mecánica de suelos i.
- Socco, L., y Strobbia, C. (2004, 11). Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics*, 2, 165-185. doi: 10.3997/1873-0604.2004015
- Stan-Kłeczek, I., y Mendecki, M. J. (2016, 10). Application of multichannel analysis of surface waves to s-phase wave anisotropy estimation. *Acta Geophysica*, 64, 1593-1604. doi: 10.1515/ACGEO-2016-0058
- Suárez, L. (2017). *OptimizaciÓn de parÁmetros para la adquisiciÓn de datos medidos in situ por medio del mÉtodo de anÁlisis multicanal de ondas superficiales (masw)*.
- Ulloa, A. (2015). *Informe de prospecciÓn geofísica proyecto escuela de minas* (Inf. Téc.).
- Wang, L., Xu, Y., y Luo, Y. (2015). Numerical investigation of 3d multichannel analysis of surface wave method. *Journal of Applied Geophysics*, 119, 156–169.

ANEXOS

Figura 21

Resultados de límites de Atterberg de la calicata 1

MUESTRA 1					
Nombre:	Angel Leodan Ramon Jara				
Fecha:	Miércoles 03 de mayo de 2023.				
Ubicación:	9685137 N	7344331 E			
Profundidad:	20 cm				
LIMITE LÍQUIDO - MÉTODO DE CAÍDA DE CONO					
ENSAYO	PENETRACIÓN	PESO TARA [gr]	PESO HÚMEDO O + TARA [gr]	PESO SECO + TARA [gr]	HUMED AD [%]
1	20.0	17.5	43.0	36.2	26.7
2	20.0	17.3	34.7	30.2	25.9
3	20.0	17.5	37.6	32.4	25.9
Interpolación					
Penetración [mm]	Humedad [%]				
20.0	26.13				
OBSERVACIÓN: El ensayo se realizó con el método de un punto.					
					
LIMITE PLÁSTICO					
ENSAYO	PESO TARA [gr]	PESO HÚMEDO + TARA [gr]	PESO SECO + TARA [gr]	HUMEDAD [%]	
1	9.8	10.5	10.3	28.6	
2	10.0	10.9	10.7	22.2	
3	9.8	10.8	10.6	20.0	
Resultados:					
LIMITE LIQUIDO		26.13			
LIMITE PLÁSTICO		23.60			
INDICE DE PLASTICIDAD		2.54			

Nota: La figura es el resultado de los límites de Atterberg en la calicata 1 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 22

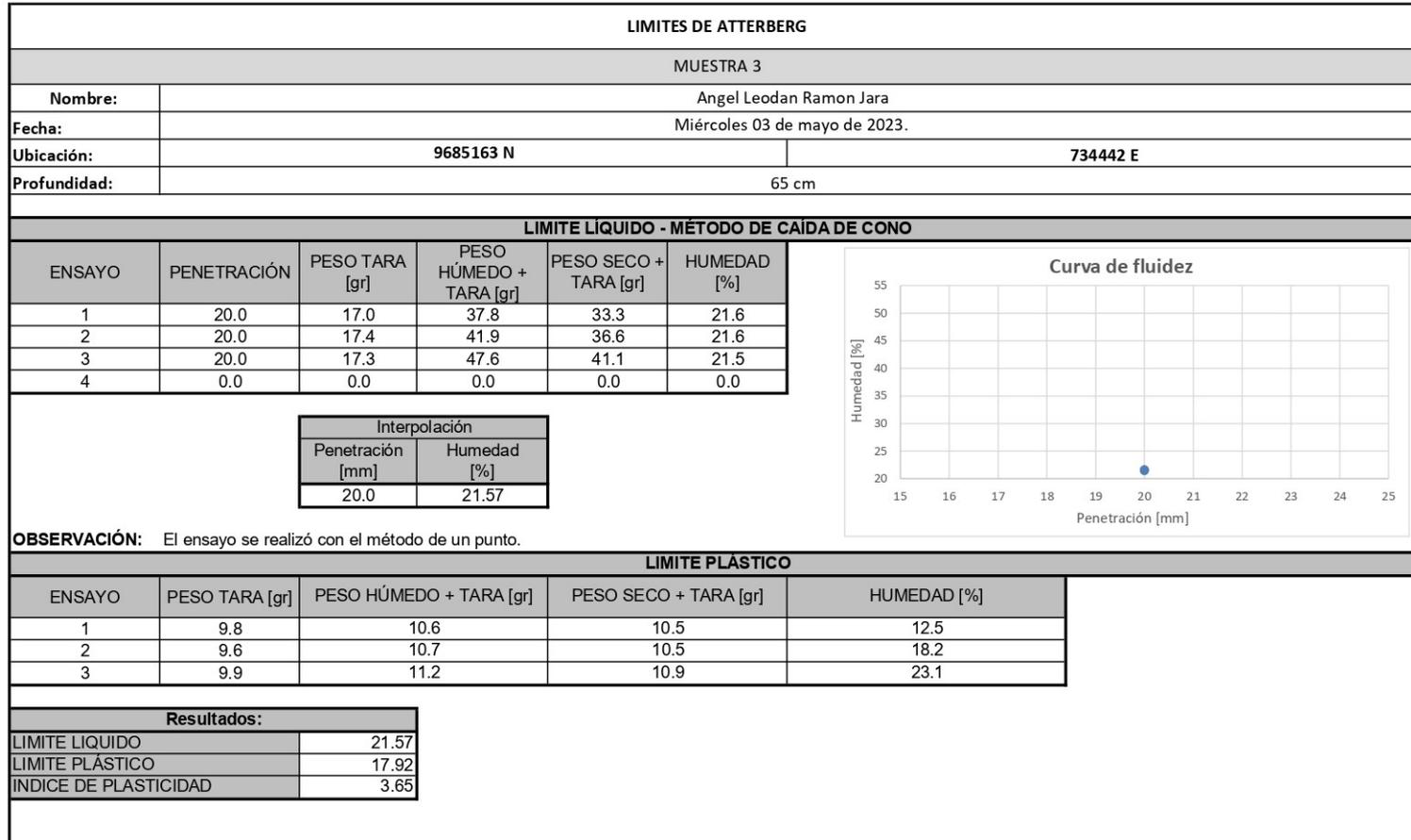
Resultados de límites de Atterberg de la calicata 2

LIMITES DE ATTERBERG					
MUESTRA 2					
Nombre:	Angel Leodan Ramon Jara				
Fecha:	Miércoles 03 de mayo de 2023.				
Ubicación:	9685138 N			7344330 E	
Profundidad:	40 cm				
LIMITE LIQUIDO - MÉTODO DE CAIDA DE CONO					
ENSAYO	PENETRACIÓN	PESO TARA [gr]	PESO HÚMEDO + TARA [gr]	PESO SECO + TARA [gr]	HUMEDAD [%]
1	20.0	17.5	42.0	35.9	24.9
2	20.0	17.0	31.7	28.1	24.5
3	20.0	16.9	37.9	32.8	24.3
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		Interpolación			
		Penetración [mm]	Humedad [%]		
		20.0	24.56		
					
OBSERVACIÓN: El ensayo se realizó con el método de un punto.					
LIMITE PLASTICO					
ENSAYO	PESO TARA [gr]	PESO HÚMEDO + TARA [gr]	PESO SECO + TARA [gr]	HUMEDAD [%]	
1	9.9	11.0	10.8	22.7	
2	9.8	10.8	10.6	25.0	
3	9.8	10.7	10.5	22.2	
Resultados:					
LIMITE LIQUIDO	24.56				
LIMITE PLÁSTICO	23.32				
INDICE DE PLASTICIDAD	1.24				

Nota: La figura es el resultado de los límites de Atterberg en la calicata 2 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 23

Resultados de límites de Atterberg de la calicata 3



Nota: La figura es el resultado de los límites de Atterberg en la calicata 3 realizada. **Fuente:** Autoría propia.

Figura 24

Granulometría de la calicata 1

GRANULOMETRIA					
MUESTRA 1					
Nombre:	Angel Leodan Ramon Jara				
Fecha:	Miércoles 03 de mayo de 2023.				
Ubicación:	9685137 N	7344331 E			
Profundidad:	20 cm				
Peso tara [gr]		125.8			
Peso seco + tara [gr]		1349.10			
Peso lavado seco + tara [gr]		1022.1			
Peso seco [gr]		1223.3			
Peso lavado seco [gr]		896.3			
# de Tamiz	Abertura	Peso de material retenido [gr]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1	25.4	0.0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4	19	46.2	3.8%	3.8%	96.2%
3/8	13	13.1	1.1%	4.8%	95.2%
N. 4	4.76	33.1	2.7%	7.6%	92.4%
N. 10	2.00	59.3	4.8%	12.4%	87.6%
N. 40	0.43	318.0	26.0%	38.4%	61.6%
N. 200	0.08	424.7	34.7%	73.1%	26.9%
Fondo		1.9	0.2%		
Finos lavado		327.0	26.7%		
TOTAL		1223.3			
Peso Inicial antes de tamizar		1223.3			
Cálculo de error		0.0%	OK		
Valor de corrección		0.0			
Tamiz de corrección		#N/D			
HUMEDAD NATURAL					
PESO HUM.		1446.8			
PESO SECO		1223.3			
% HUMEDAD		18.3%			
M. de finura arena		1.40			
Peso muestra [gr]	Peso Grava [gr]	Peso Arena [gr]	Peso Finos [gr]		
1223.3	92.4	802.0	328.9		
100.0%	7.6%	65.6%	26.9%		

Nota: Resultado de la granulometria que compone la calicata 1 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 25

Granulometría de la calicata 2

GRANULOMETRIA						
MUESTRA 2						
Nombre:	Angel Leodan Ramon Jara					
Fecha:	Miércoles 03 de mayo de 2023.					
Ubicación:	9685138 N			7344330 E		
Profundidad:	40cm					
Peso tara [gr]	103.0					
Peso seco + tara [gr]	837.50					
Peso lavado seco + tara [gr]	680.4					
Peso seco [gr]	734.5					
Peso lavado seco [gr]	577.4					
# de Tamiz	Abertura	Peso de material retenido [gr]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa	Valor corrección
1	25.4	0.0	0.0%	0.0%	100.0%	
3/4	19	53.0	7.2%	7.2%	92.8%	
3/8	13	69.8	9.5%	16.7%	83.3%	
N. 4	4.76	33.1	4.5%	21.2%	78.8%	
N. 10	2.00	26.4	3.6%	24.8%	75.2%	
N. 40	0.43	167.8	22.8%	47.7%	52.3%	
N. 200	0.08	226.5	30.8%	78.5%	21.5%	
Fondo		0.8	0.1%			
Finos lavado		157.1	21.4%			
TOTAL		734.5				
HUMEDAD NATURAL						
PESO HUM.		855.4				
PESO SECO		734.5				
% HUMEDAD		16.5%				
M. de finura arena		1.96				
Peso muestra [gr]	Peso Grava [gr]	Peso Arena [gr]	Peso Finos [gr]			
734.5	155.9	420.7	157.9			
100.0%	21.2%	57.3%	21.5%			

Nota: La figura es el resultado de la granulometria que compone la calicata 2 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 26

Granulometría de la calicata 3

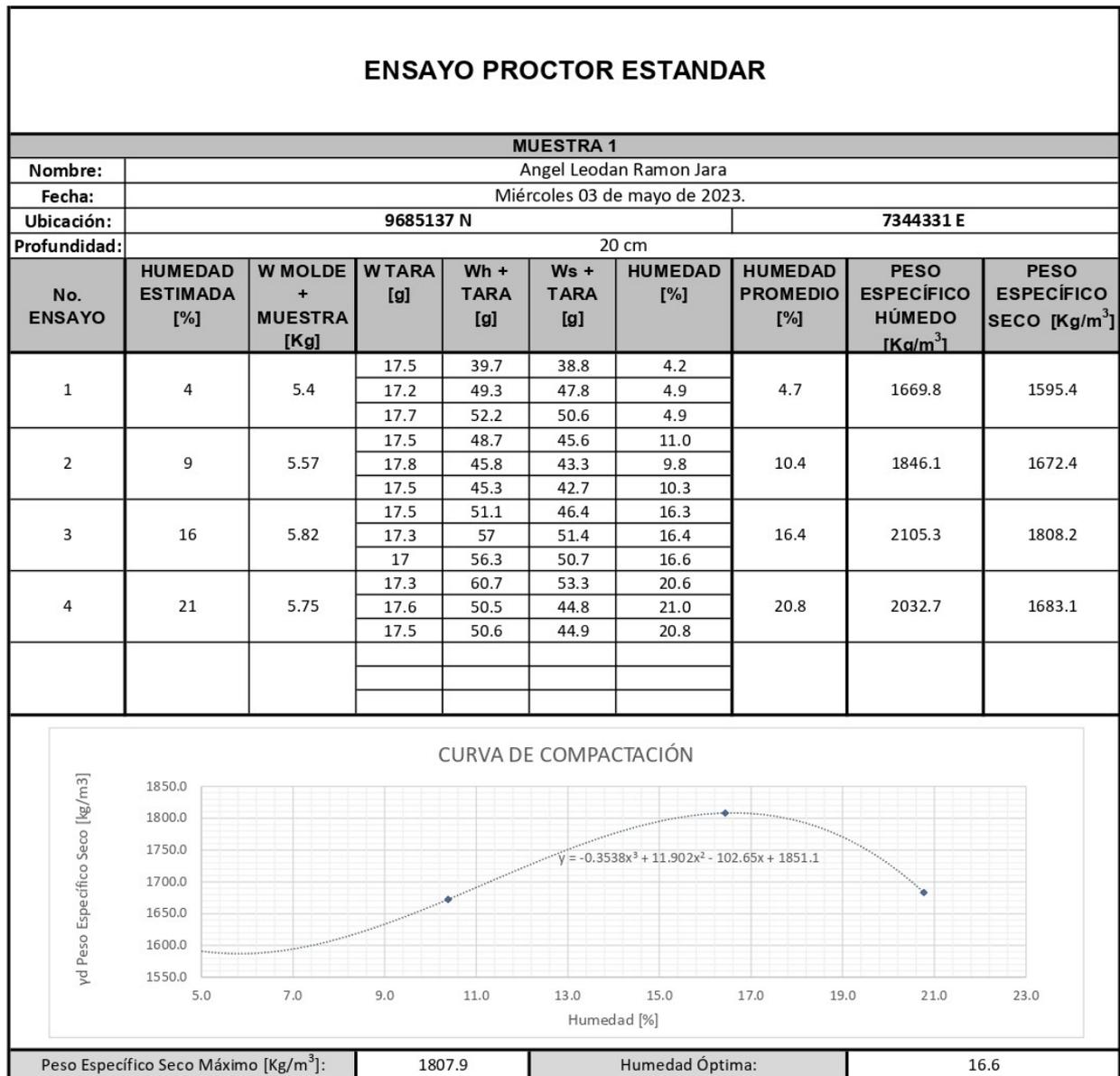
GRANULOMETRIA					
MUESTRA 1					
Nombre:	Angel Leodan Ramon Jara				
Fecha:	Miércoles 03 de mayo de 2023.				
Ubicación:	9685137 N	7344331 E			
Profundidad:	20 cm				
Peso tara [gr]		125.8			
Peso seco + tara [gr]		1349.10			
Peso lavado seco + tara [gr]		1022.1			
Peso seco [gr]		1223.3			
Peso lavado seco [gr]		896.3			
# de Tamiz	Abertura	Peso de material retenido [gr]	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Que pasa
1	25.4	0.0	0.0%	0.0%	100.0%
3/4	19	46.2	3.8%	3.8%	96.2%
3/8	13	13.1	1.1%	4.8%	95.2%
N. 4	4.76	33.1	2.7%	7.6%	92.4%
N. 10	2.00	59.3	4.8%	12.4%	87.6%
N. 40	0.43	318.0	26.0%	38.4%	61.6%
N. 200	0.08	424.7	34.7%	73.1%	26.9%
Fondo		1.9	0.2%		
Finos lavado		327.0	26.7%		
TOTAL		1223.3			
Peso Inicial antes de tamizar		1223.3			
Cálculo de error		0.0%	OK		
Valor de corrección		0.0			
Tamiz de corrección		#N/D			
HUMEDAD NATURAL					
PESO HUM.		1446.8			
PESO SECO		1223.3			
% HUMEDAD		18.3%			
M. de finura arena		1.40			
Peso muestra [gr]	Peso Grava [gr]	Peso Arena [gr]	Peso Finos [gr]		
1223.3	92.4	802.0	328.9		
100.0%	7.6%	65.6%	26.9%		

Nota: La figura es el resultado de la granulometria que compone la calicata 3 realizada.

Fuente: Autoria propia.

Figura 27

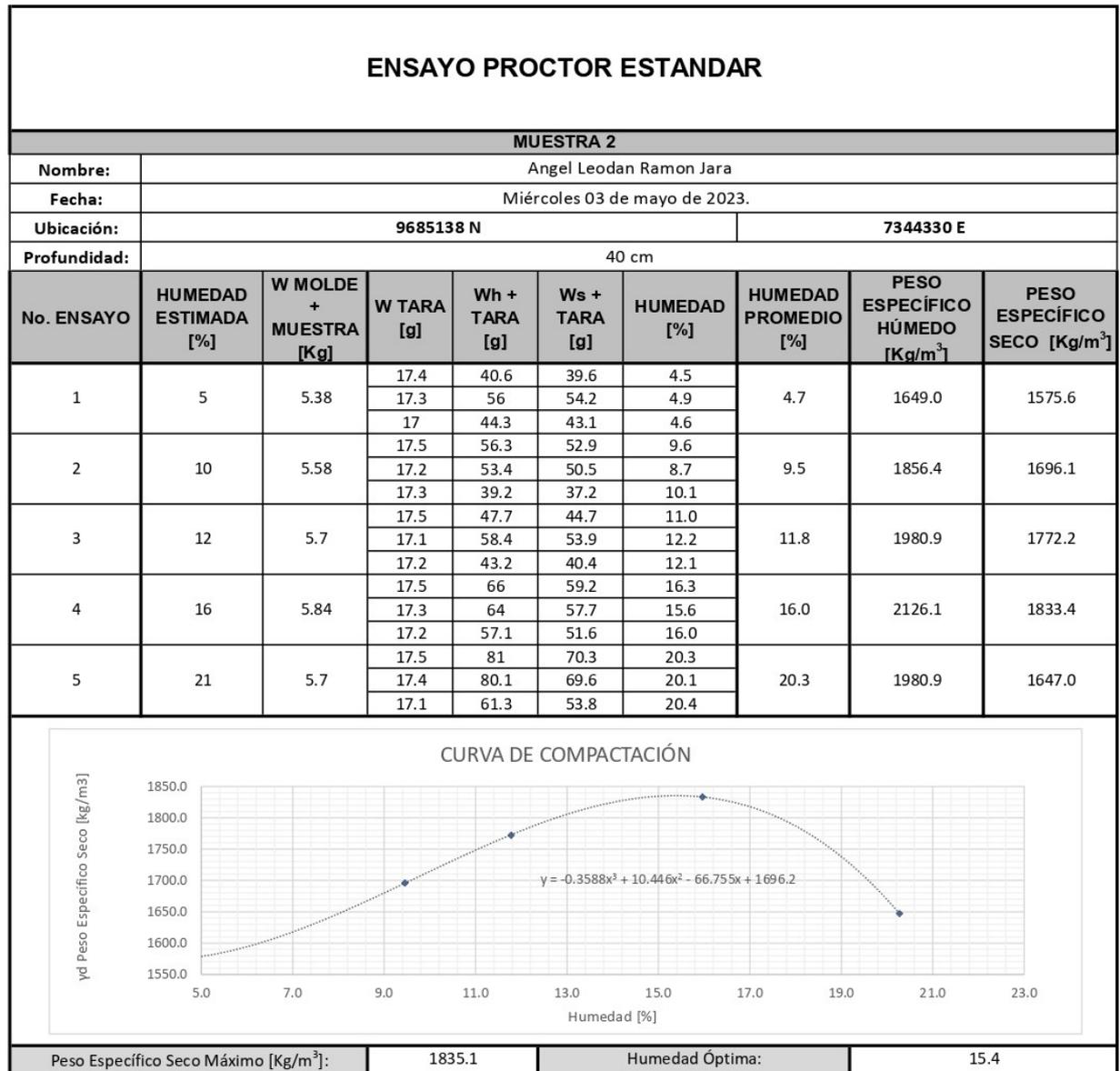
Proctor de la calicata 1



Nota: La figura es el resultado del Proctor la calicata 1 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 28

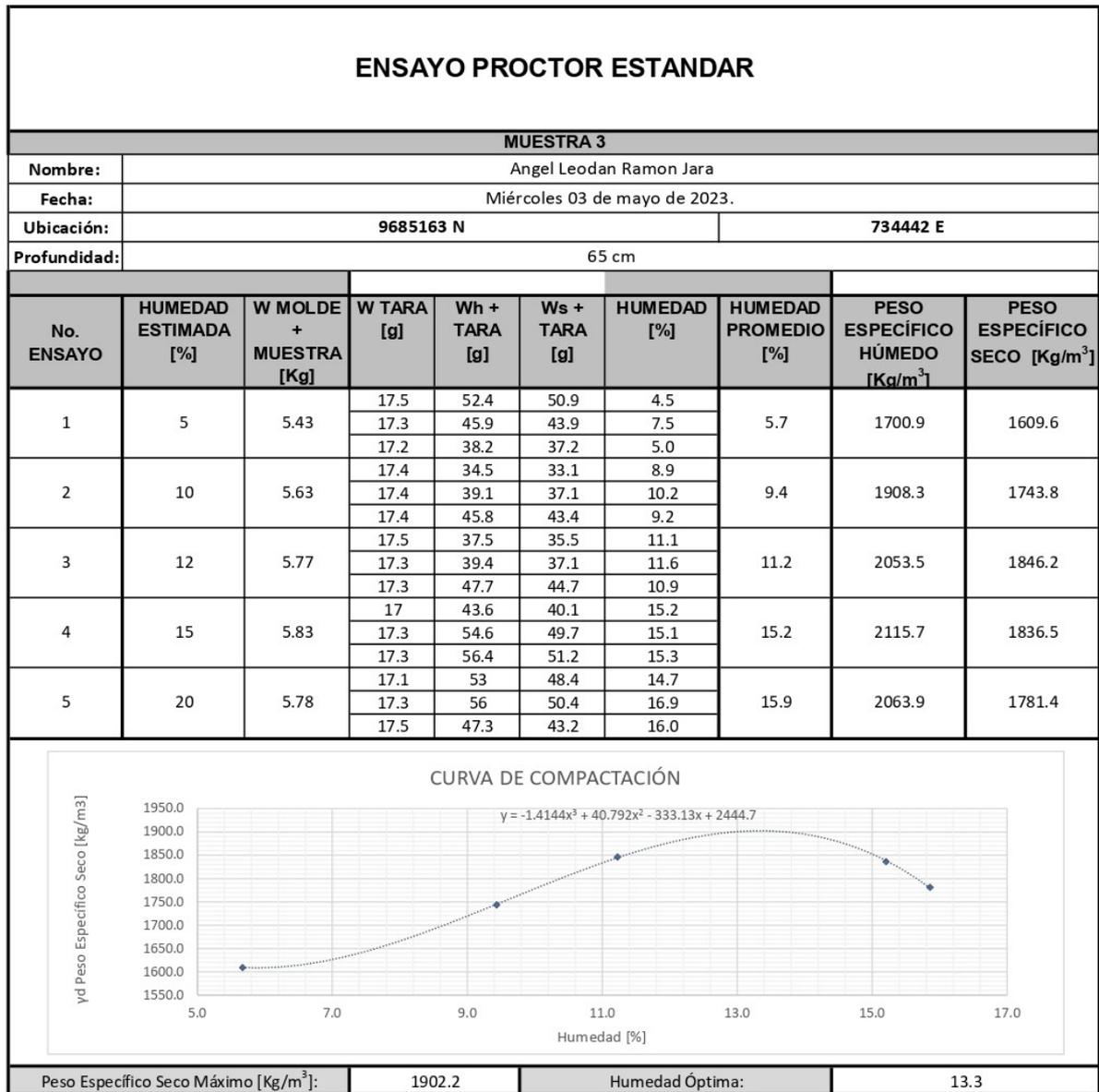
Proctor de la calicata 2



Nota: La figura es el resultado del Proctor la calicata 2 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 29

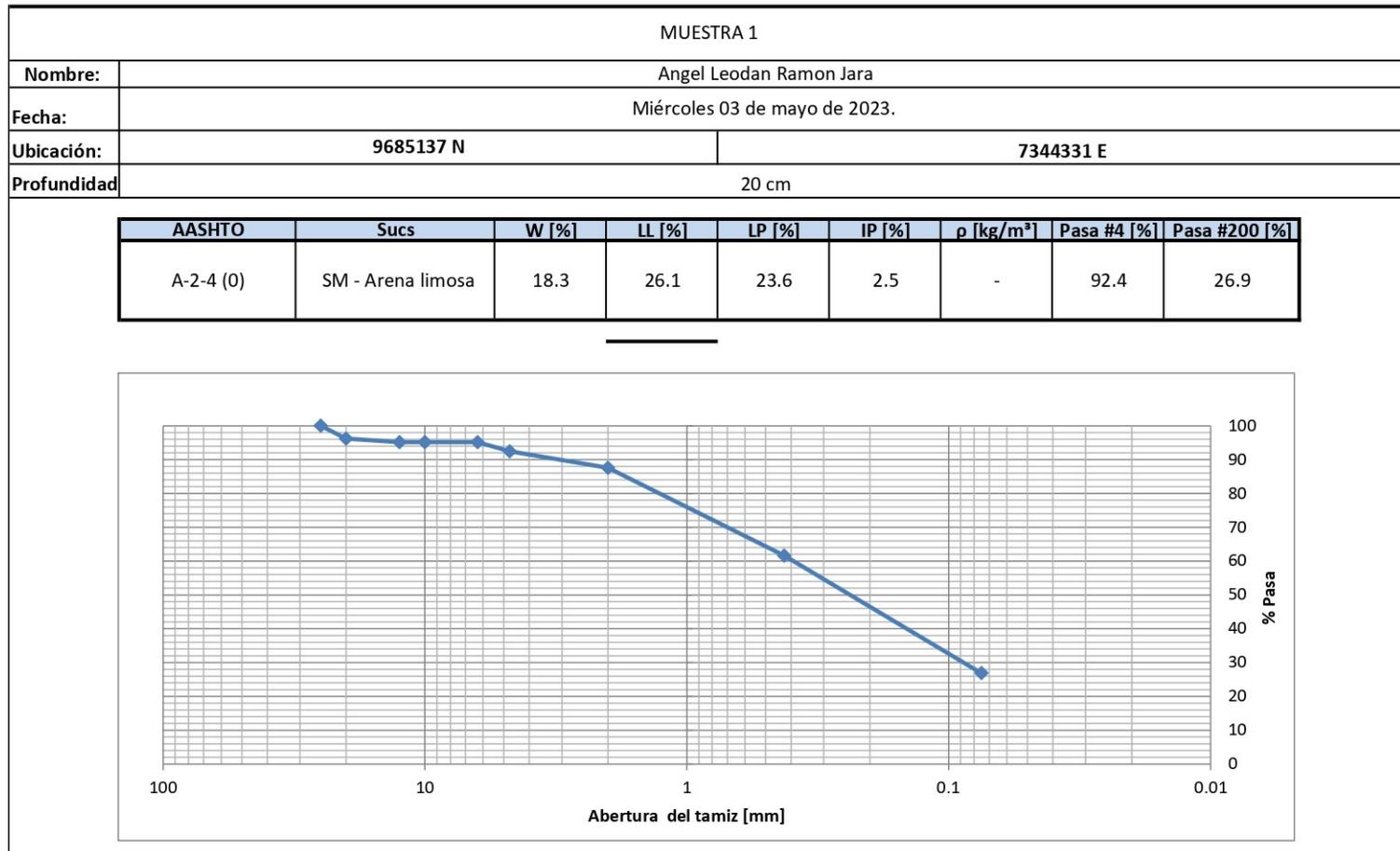
Proctor de la calicata 3



Nota: La figura es el resultado del Proctor la calicata 3 realizada. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 30

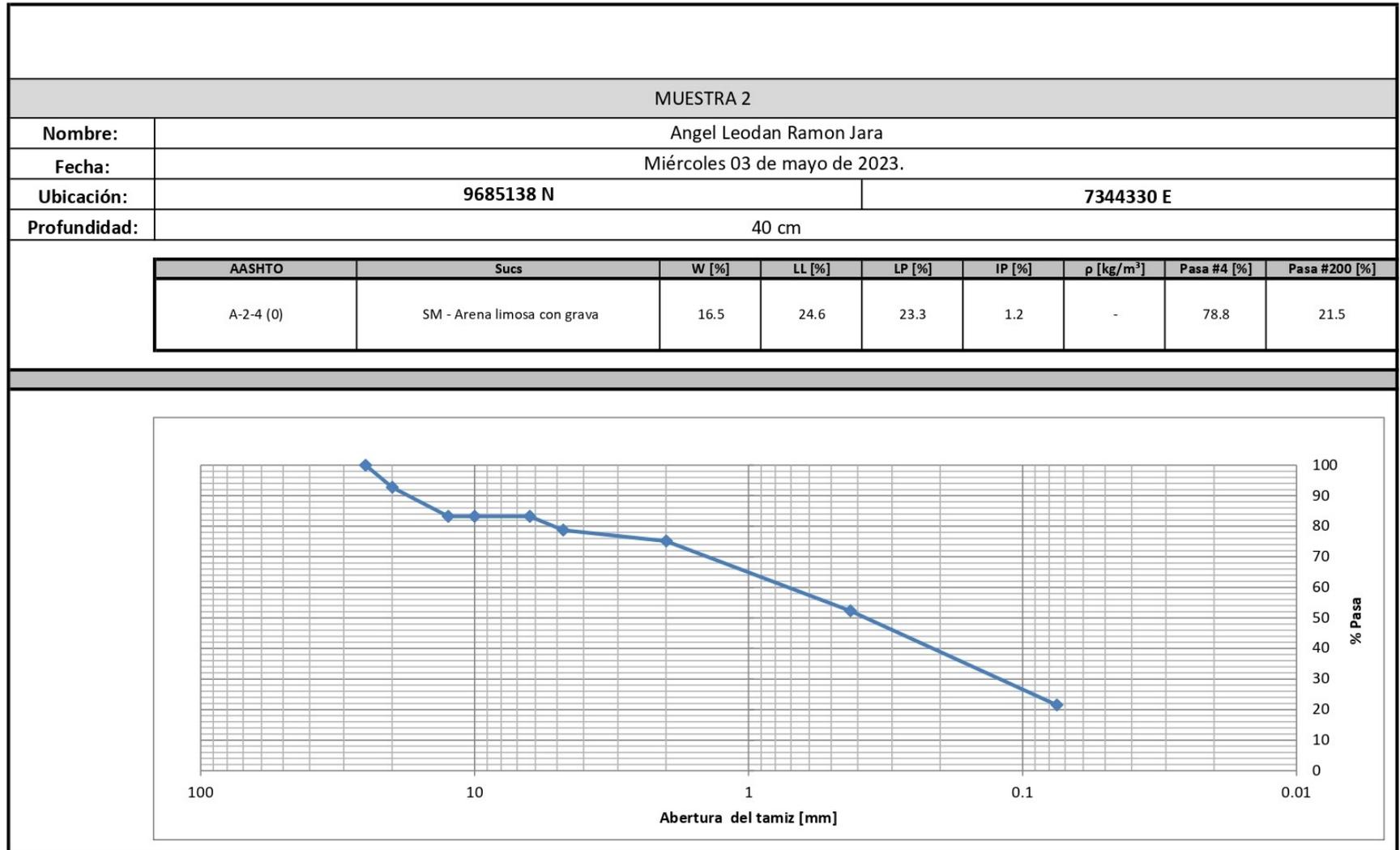
Clasificación de la calicata 1



Nota: La figura es el resultado de la clasificación de la calicata 1. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 31

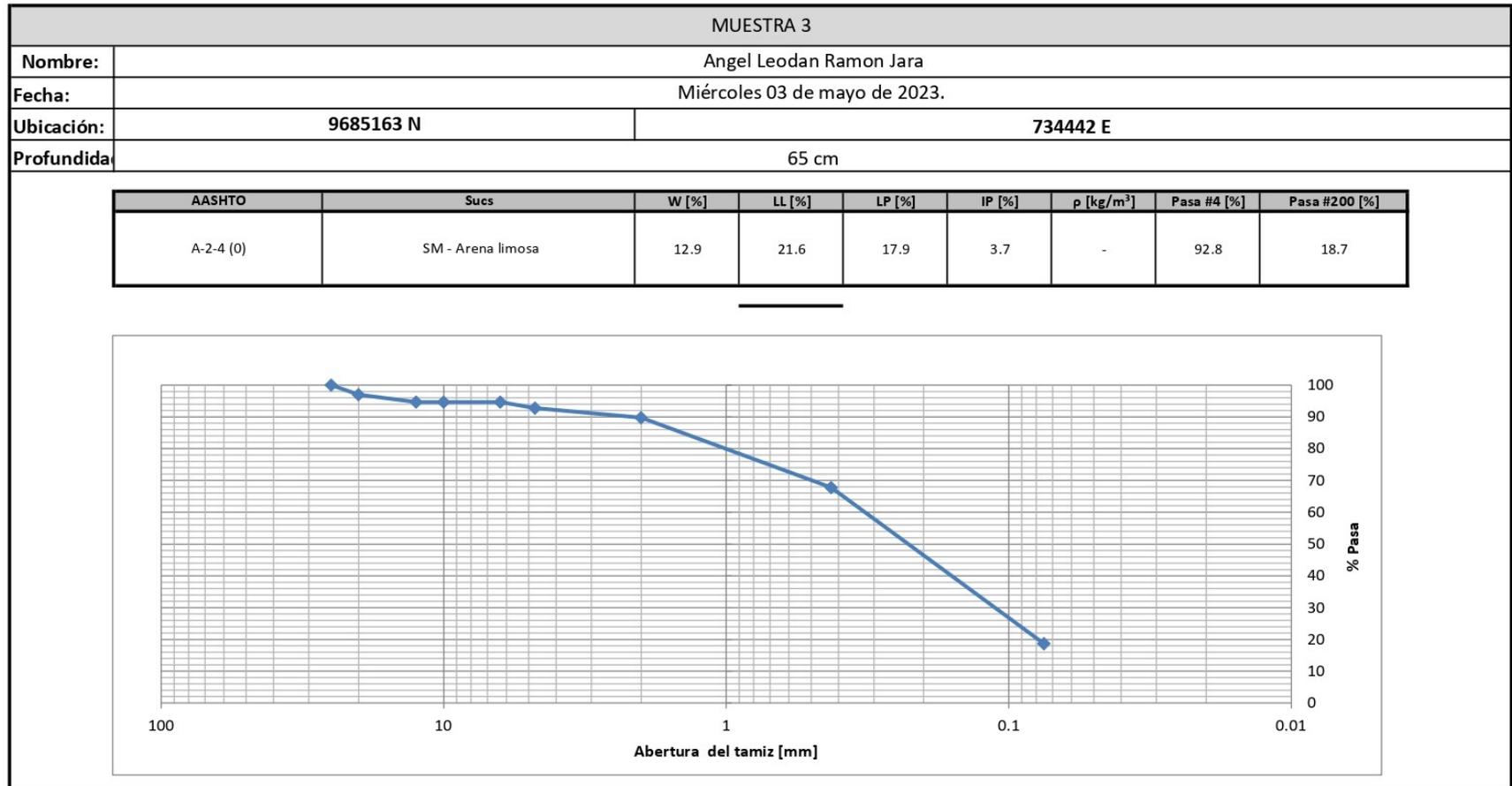
Clasificación de la calicata 2



Nota: La figura es el resultado de la clasificación de la calicata 2. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 32

Clasificación de la calicata 3



Nota: La figura es el resultado de la clasificación de la calicata 3. **Fuente:** Autoría propia.

Figura 33

Ensayo de límites de Atterberg



Nota: Realización del ensayo de límites de Atterberg. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 34

Preparación de muestras



Nota: Preparación de muestras para realizar límites de Atterberg. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 35

Material lavado



Nota: Material lavado para su respectiva clasificación. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 36

Secado de muestras



Nota: Secado de muestras para los ensayos de límites de Atterberg. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 37

Preparación de material



Nota: Preparación de material para la compactación de Proctor. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 38

Ensayo de proctor



Nota: Compactacion del material. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 39

Preparación CBR



Nota: Preparacion de material para el ensayo CBR. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 40

Ensayo CBR



Nota: Realizacion del Ensayo CBR. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 41

Compactación de CBR



Nota: Compactacion de material en el ensayo CBR. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 42

Saturación CBR



Nota: Saturación de muestra compactada para CBR. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 43

Secado de muestra



Nota: Secado de muestra de CBR después de estar 96 horas en agua. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 44

Ensayo de ruptura— CBR



Nota: Ruptura de muestra aplicando de carga. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 45

Muestra luego de ensayar



Nota: Muestra luego de aplicar la carga axial. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 46

Línea MASW 1



Nota: Tendido de línea 1 para la adquisición de datos. **Fuente:** Autoría propia.

Figura 47

Línea MASW 2



Nota: Tendido de línea 2 para la adquisición de datos. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 48

Línea MASW 2



Nota: Tendido de línea 2 para la adquisición de datos. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 49

Línea MASW 3



Nota: Tendido de línea 3 para la adquisición de datos. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 50

CBR 1

ENSAYO CBR									
NOMBRE:		ANGEL LEODAN RAMON JARA							
NORMA:		ASTM D1880							
TEMA:		TRABAJO DE TITULACIÓN							

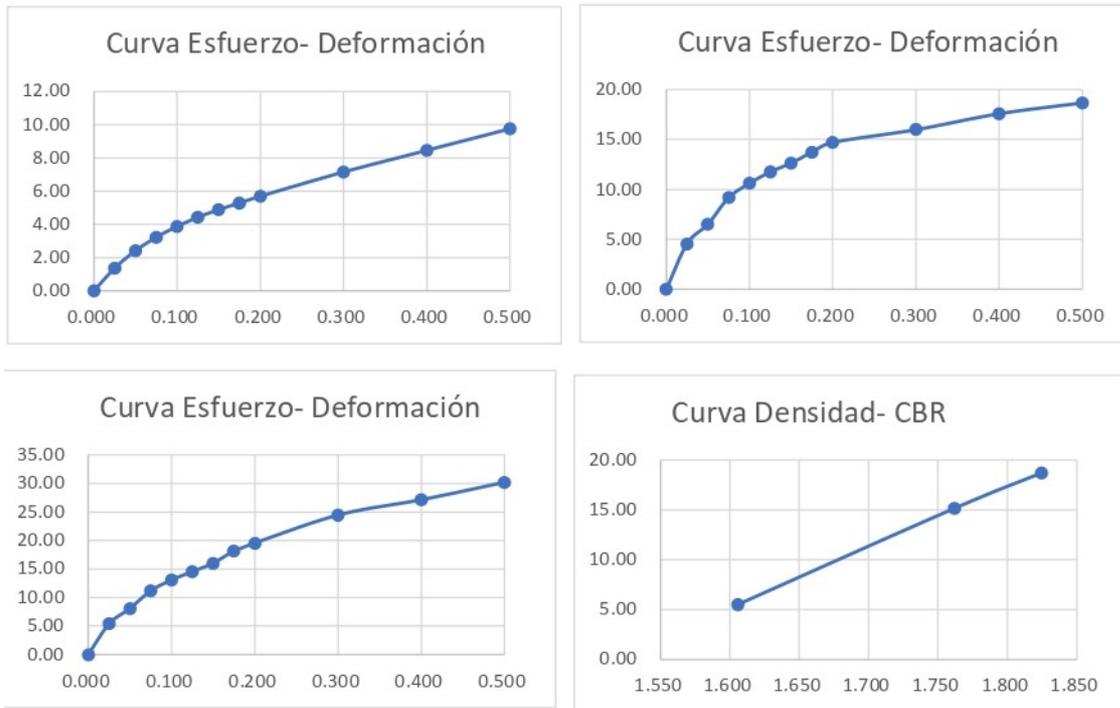
COMPACTACION C B R									
MOLDE	1			2			3		
Altura Molde mm.	120			120			120		
N° Capas	5			5			5		
N°Golp x Capa	10			25			55		
Cond. Muestra	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES
P. Húm. + Molde	10125.00		10187.63	11340.00		11492.09	11530.00		11629.34
Peso Molde (gr)	6040.00		6040.00	6700.00		6700.00	6700.00		6700.00
Peso Húmedo (gr)	4085.00		4147.63	4640.00		4792.09	4830.00		4929.34
Vol. Molde (cc)	2177.51		2177.51	2264.31		2264.31	2264.31		2264.31
Densidad H.(gr/cc)	1.88		1.90	2.05		2.12	2.13		2.18
Número de Ensayo	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
P. Húmedo + Tara	54.81	61.24	52.86	48.80	51.40	71.87	38.70	41.40	60.05
Peso Seco + Tara	49.38	54.98	47.28	44.25	46.80	62.76	35.74	37.80	53.12
Peso Agua (gr)	5.43	6.26	5.58	4.55	4.60	9.11	2.96	3.60	6.93
Peso Tara (gr)	17.29	17.57	17.31	17.29	17.57	17.48	17.42	17.43	17.25
P. Muestra Seca	32.09	37.41	29.97	26.96	29.23	45.28	18.32	20.37	35.87
Cont. Humedad	16.92%	16.73%	18.62%	16.88%	15.74%	20.12%	16.16%	17.67%	19.32%
Cont.Hum.Prom.	16.83%		18.62%	16.31%		20.12%	16.92%		19.32%
DENSIDAD SECA	1.606		1.606	1.762		1.762	1.824		1.824

ENSAYO DE HINCHAMIENTO										
TIEMPO		NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE		
ACUMULADO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO	
(Hs)	(Dias)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
24	1	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
48	2	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
72	3	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
96	4	1.100	1.100	0.92	1.200	1.200	1.00	1.850	1.850	1.54

ENSAYO CARGA - PENETRACION										
PENETRACION		MOLDE N° 01			MOLDE N° 02		MOLDE N° 03			
(mm)	(pulg)	CARGA	ESFUERZO		CARGA	ESFUERZO		CARGA	ESFUERZO	
0.00	0.000	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00
0.64	0.025	28	1.36	92	4.54	110	5.43	110	5.43	5.43
1.27	0.050	49	2.41	132	6.51	164	8.09	164	8.09	8.09
1.91	0.075	65	3.22	186	9.18	227	11.20	227	11.20	11.20
2.54	0.100	78	3.87	215	10.61	265	13.07	265	13.07	13.07
3.18	0.125	90	4.43	238	11.74	295	14.55	295	14.55	14.55
3.81	0.150	99	4.88	256	12.63	325	16.03	325	16.03	16.03
4.45	0.175	107	5.28	278	13.72	368	18.16	368	18.16	18.16
5.08	0.200	115	5.68	298	14.70	396	19.54	396	19.54	19.54
5.72	0.225	123	6.08	318	15.69	425	20.92	425	20.92	20.92
6.35	0.250	131	6.48	338	16.67	454	22.30	454	22.30	22.30
6.99	0.275	139	6.88	358	17.66	483	23.68	483	23.68	23.68
7.62	0.300	145	7.14	374	18.65	512	25.06	512	25.06	25.06
8.26	0.325	151	7.54	394	19.63	541	26.44	541	26.44	26.44
8.90	0.350	157	7.94	414	20.62	570	27.82	570	27.82	27.82
9.54	0.375	163	8.34	434	21.60	600	29.20	600	29.20	29.20
10.18	0.400	171	8.84	454	22.59	629	30.58	629	30.58	30.58
10.82	0.425	177	9.24	474	23.57	658	31.96	658	31.96	31.96
11.46	0.450	183	9.64	494	24.56	687	33.34	687	33.34	33.34
12.10	0.475	189	10.04	514	25.54	716	34.72	716	34.72	34.72
12.74	0.500	198	10.74	534	26.53	745	36.10	745	36.10	36.10
13.38	0.525	204	11.14	554	27.51	774	37.48	774	37.48	37.48
14.02	0.550	210	11.54	574	28.50	803	38.86	803	38.86	38.86
14.66	0.575	216	11.94	594	29.48	832	40.24	832	40.24	40.24
15.30	0.600	222	12.34	614	30.47	861	41.62	861	41.62	41.62
15.94	0.625	228	12.74	634	31.45	890	43.00	890	43.00	43.00
16.58	0.650	234	13.14	654	32.44	919	44.38	919	44.38	44.38
17.22	0.675	240	13.54	674	33.42	948	45.76	948	45.76	45.76
17.86	0.700	246	13.94	694	34.41	977	47.14	977	47.14	47.14
18.50	0.725	252	14.34	714	35.39	1006	48.52	1006	48.52	48.52
19.14	0.750	258	14.74	734	36.38	1035	49.90	1035	49.90	49.90
19.78	0.775	264	15.14	754	37.36	1064	51.28	1064	51.28	51.28
20.42	0.800	270	15.54	774	38.35	1093	52.66	1093	52.66	52.66
21.06	0.825	276	15.94	794	39.33	1122	54.04	1122	54.04	54.04
21.70	0.850	282	16.34	814	40.32	1151	55.42	1151	55.42	55.42
22.34	0.875	288	16.74	834	41.30	1180	56.80	1180	56.80	56.80
22.98	0.900	294	17.14	854	42.29	1209	58.18	1209	58.18	58.18
23.62	0.925	300	17.54	874	43.27	1238	59.56	1238	59.56	59.56
24.26	0.950	306	17.94	894	44.26	1267	60.94	1267	60.94	60.94
24.90	0.975	312	18.34	914	45.24	1296	62.32	1296	62.32	62.32
25.54	1.000	318	18.74	934	46.23	1325	63.70	1325	63.70	63.70
26.18	1.025	324	19.14	954	47.21	1354	65.08	1354	65.08	65.08
26.82	1.050	330	19.54	974	48.20	1383	66.46	1383	66.46	66.46
27.46	1.075	336	19.94	994	49.18	1412	67.84	1412	67.84	67.84
28.10	1.100	342	20.34	1014	50.17	1441	69.22	1441	69.22	69.22
28.74	1.125	348	20.74	1034	51.15	1470	70.60	1470	70.60	70.60
29.38	1.150	354	21.14	1054	52.14	1500	71.98	1500	71.98	71.98
30.02	1.175	360	21.54	1074	53.12	1529	73.36	1529	73.36	73.36
30.66	1.200	366	21.94	1094	54.11	1558	74.74	1558	74.74	74.74
31.30	1.225	372	22.34	1114	55.09	1587	76.12	1587	76.12	76.12
31.94	1.250	378	22.74	1134	56.08	1616	77.50	1616	77.50	77.50
32.58	1.275	384	23.14	1154	57.06	1645	78.88	1645	78.88	78.88
33.22	1.300	390	23.54	1174	58.05	1674	80.26	1674	80.26	80.26
33.86	1.325	396	23.94	1194	59.03	1703	81.64	1703	81.64	81.64
34.50	1.350	402	24.34	1214	60.02	1732	83.02	1732	83.02	83.02
35.14	1.375	408	24.74	1234	61.00	1761	84.40	1761	84.40	84.40
35.78	1.400	414	25.14	1254	62.00	1790	85.78	1790	85.78	85.78
36.42	1.425	420	25.54	1274	62.98	1820	87.16	1820	87.16	87.16
37.06	1.450	426	25.94	1294	63.97	1849	88.54	1849	88.54	88.54
37.70	1.475	432	26.34	1314	64.95	1878	89.92	1878	89.92	89.92
38.34	1.500	438	26.74	1334	65.94	1907	91.30	1907	91.30	91.30
38.98	1.525	444	27.14	1354	66.92	1936	92.68	1936	92.68	92.68
39.62	1.550	450	27.54	1374	67.91	1965	94.06	1965	94.06	94.06
40.26	1.575	456	27.94	1394	68.90	1994	95.44	1994	95.44	95.44
40.90	1.600	462	28.34	1414	69.88	2023	96.82	2023	96.82	96.82
41.54	1.625	468	28.74	1434	70.87	2052	98.20	2052	98.20	98.20
42.18	1.650	474	29.14	1454	71.85	2081	99.58	2081	99.58	99.58
42.82	1.675	480	29.54	1474	72.84	2110	100.96	2110	100.96	100.96
43.46	1.700	486	29.94	1494	73.82	2139	102.34	2139	102.34	102.34
44.10	1.725	492	30.34	1514	74.81	2168	103.72	2168	103.72	103.72
44.74	1.750	498	30.74	1534	75.79	2197	105.10	2197	105.10	105.10
45.38	1.775	504	31.14	1554	76.78	2226	106.48	2226	106.48	106.48
46.02	1.800	510	31.54	1574	77.76	2255	107.86	2255	107.86	107.86
46.66	1.825	516	31.94	1594	78.75	2284	109.24	2284	109.24	109.24
47.30	1.850	522	32.34	1614	79.73	2313	110.62	2313	110.62	110.62
47.94	1.875	528	32.74	1634	80.72	2342	112.00	2342	112.00	112.00
48.58	1.9									

Figura 51

Gráficas CBR 1.



PENTRC.	0.1 (*)	0.2 (*)
MOLDE 1	5.50	5.41
MOLDE 2	15.15	14.00
MOLDE 3	18.68	18.61

	DENS	0.1	0.2	CBR
MOLDE 1	1.606	5.50	5.41	5.50
MOLDE 2	1.762	15.15	14.00	15.15
MOLDE 3	1.824	18.68	18.61	18.68

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. =	17.20%
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. =	12.00%

Nota: Hoja de gráficas- CBR 1. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 52

CBR 2

ENSAYO CBR									
NOMBRE:		ANGEL LEODAN RAMON JARA							
NORMA:		ASTM D1880							
TEMA:		TRABAJO DE TITULACIÓN							
MOLDE	1			2			3		
Altura Molde mm.	120			120			120		
N° Capas	5			5			5		
N°Golp x Capa	12			30			63		
Cond. Muestra	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES
P. Húm.+ Molde	10840.00		10971.55	11695.00		12460.18	11390.00		11557.41
Peso Molde (gr)	6954.80		6954.80	7033.00		7033.00	6201.60		6201.60
Peso Húmedo (gr)	3885.20		4016.75	4662.00		5427.18	5188.40		5355.81
Vol. Molde (cc)	2177.51		2177.51	2264.31		2264.31	2264.31		2264.31
Densidad H.(gr/cc)	1.78		1.84	2.06		2.40	2.29		2.37
Número de ensayo	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
P.Húmedo + Tara	54.79	61.24	62.86	56.60	54.32	71.03	68.90	55.40	60.60
Peso Seco + Tara	50.40	55.87	56.08	52.90	49.90	63.48	62.70	50.85	54.20
Peso Agua (gr)	4.39	5.37	6.78	3.70	4.42	7.55	6.20	4.55	6.40
Peso Tara (gr)	17.29	17.57	17.31	17.29	17.57	17.48	17.42	17.43	17.25
P. Muestra Seca	33.11	38.30	38.77	35.61	32.33	46.00	45.28	33.42	36.95
Cont. Humedad	13.26%	14.02%	17.49%	10.39%	13.67%	16.41%	13.69%	13.61%	17.32%
Cont.Hum.Prom.	13.64%		17.49%	12.03%		16.41%	13.65%		17.32%
DENSIDAD SECA	1.570		1.570	1.838		1.838	2.016		2.016

ENSAYO DE HINCHAMIENTO

TIEMPO ACUMULADO		NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE		
		LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO		LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO		LECTURA DEFORM.	HINCHAMIENTO	
(Hs)	(Días)		(mm)	(%)		(mm)	(%)		(mm)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
24	1	0.100	0.100	0.08	0.100	0.100	0.08	0.500	0.500	0.42
48	2	0.100	0.100	0.08	0.200	0.200	0.17	0.500	0.500	0.42
72	3	0.200	0.200	0.17	0.300	0.300	0.25	0.600	0.600	0.50
96	4	0.200	0.200	0.17	0.400	0.400	0.33	1.000	1.000	0.83

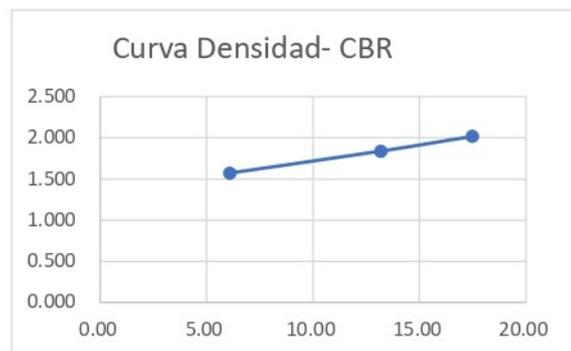
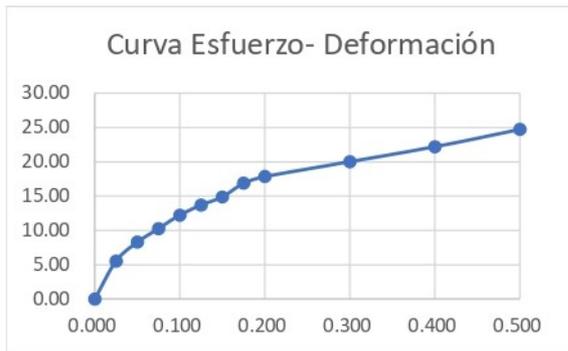
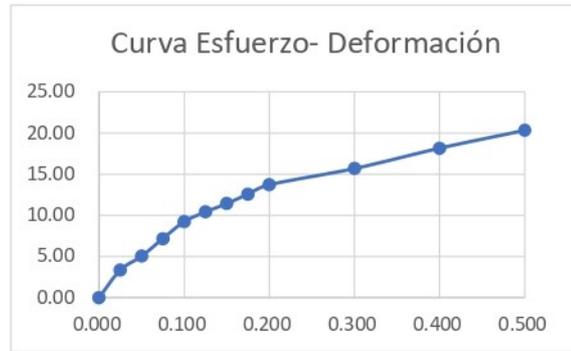
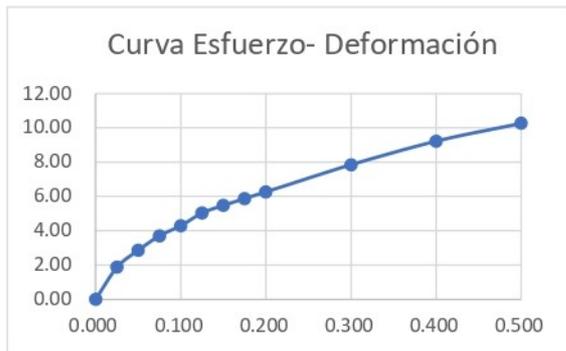
ENSAYO CARGA - PENETRACION

PENETRACION		MOLDE N° 01		MOLDE N° 02		MOLDE N° 03	
(mm)	(pulg)	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO
0.00	0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.64	0.025	38	1.87	68	3.35	112	5.53
1.27	0.050	58	2.86	102	5.03	168	8.29
1.91	0.075	75	3.70	145	7.15	208	10.26
2.54	0.100	87	4.29	187	9.23	248	12.24
3.18	0.125	102	5.03	211	10.41	278	13.72
3.81	0.150	111	5.48	232	11.45	302	14.90
4.45	0.175	119	5.87	255	12.58	342	16.87
5.08	0.200	127	6.27	278	13.72	362	17.86
7.62	0.300	159	7.84	318	15.69	406	20.03
10.16	0.400	187	9.23	368	18.16	450	22.20
12.70	0.500	208	10.26	412	20.33	501	24.72

Nota: Hoja de trabajo- CBR 2. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 53

Gráficas CBR 2



PENTRC.	0.1 (*)	0.2 (*)
MOLDE 1	6.09	5.97
MOLDE 2	13.18	13.06
MOLDE 3	17.48	17.01

	DENS	0.1	0.2	CBR
MOLDE 1	1.570	6.09	5.97	6.09
MOLDE 2	1.838	13.18	13.06	13.18
MOLDE 3	2.016	17.48	17.01	17.48

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. =	14.70%
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. =	12.50%

Nota: Hoja de gráficas- CBR 2. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 54

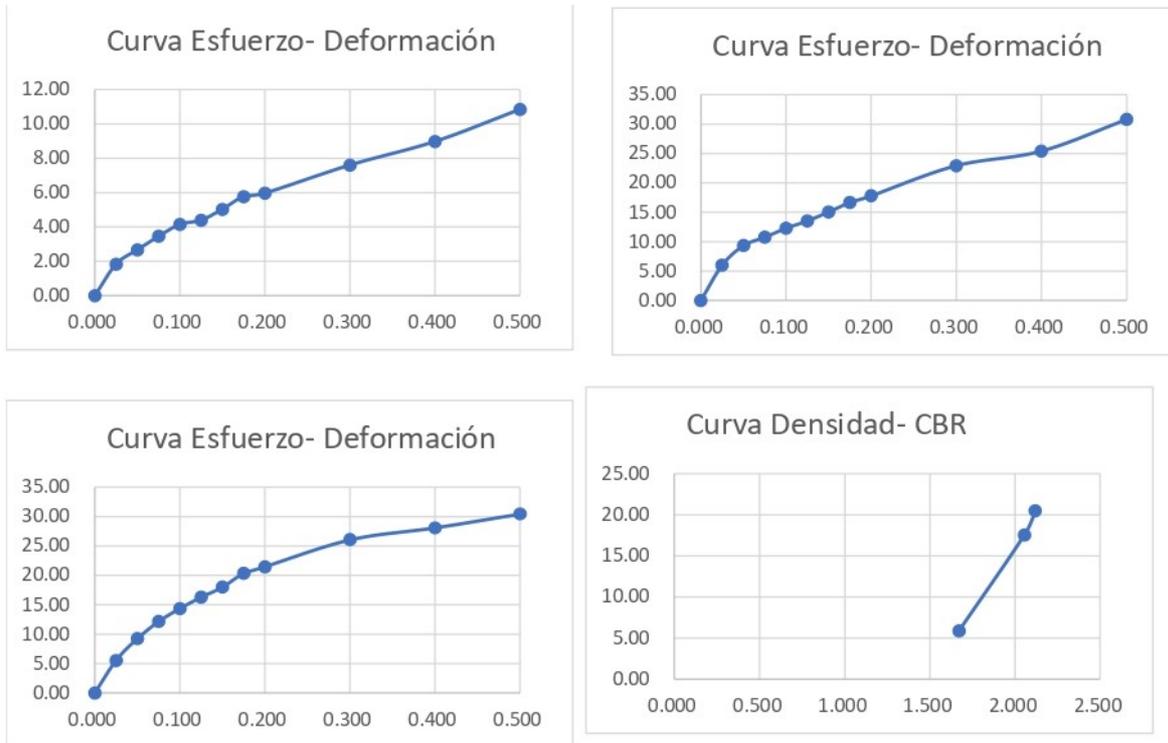
CBR 3

ENSAYO CBR										
NOMBRE:		ANGEL LEODAN RAMON JARA								
NORMA:		ASTM D1880								
TEMA:		TRABAJO DE TITULACIÓN								
COMPACTACION C B R										
MOLDE	1			2			3			
Altura Molde mm.	120			120			120			
Nº Capas	5			5			5			
Nº Golp x Capa	10			25			55			
Cond. Muestra	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES		
P. Húm.+ Molde	10190.00	10356.86	11340.00	11430.42	11430.00	11753.16				
Peso Molde (gr)	6040.00	6040.00	6040.00	6040.00	6040.00	6040.00				
Peso Húmedo (gr)	4150.00	4316.86	5300.00	5390.42	5390.00	5713.16				
Vol. Molde (cc)	2177.51	2177.51	2264.31	2264.31	2264.31	2264.31				
Densidad H.(gr/cc)	1.91	1.98	2.34	2.38	2.38	2.52				
Número de Ensayo	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C	
P.Húmedo + Tara	54.81	61.24	52.86	48.80	51.40	71.87	38.70	41.40	60.05	
Peso Seco + Tara	50.38	55.65	47.28	44.95	47.30	64.45	36.34	38.80	53.20	
Peso Agua (gr)	4.43	5.59	5.58	3.85	4.10	7.42	2.36	2.60	6.85	
Peso Tara (gr)	17.29	17.57	17.31	17.29	17.57	17.48	17.42	17.43	17.25	
P. Muestra Seca	33.09	38.08	29.97	27.66	29.73	46.97	18.92	21.37	35.95	
Cont. Humedad	13.39%	14.68%	18.62%	13.92%	13.79%	15.80%	12.47%	12.17%	19.05%	
Cont.Hum.Prom.	14.03%		18.62%	13.85%		15.80%	12.32%		19.05%	
DENSIDAD SECA	1.671		1.671	2.056		2.056	2.119		2.119	
ENSAYO DE HINCHAMIENTO										
TIEMPO		NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE		
ACUMULADO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO	
(Hs)	(Dias)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
24	1	0.400	0.400	0.33	0.050	0.050	0.04	0.600	0.600	0.50
48	2	0.400	0.400	0.33	0.200	0.200	0.17	0.900	0.900	0.75
72	3	0.400	0.400	0.33	0.400	0.400	0.33	1.000	1.000	0.83
96	4	0.400	0.400	0.33	0.400	0.400	0.33	1.000	1.000	0.83
ENSAYO CARGA - PENETRACION										
PENETRACION		MOLDE N° 01		MOLDE N° 02		MOLDE N° 03				
(mm)	(pulg)	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO			
0.00	0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00			
0.64	0.025	37	1.83	122	6.02	112	5.53			
1.27	0.050	54	2.66	189	9.32	187	9.23			
1.91	0.075	70	3.45	218	10.76	246	12.14			
2.54	0.100	84	4.14	249	12.29	291	14.36			
3.18	0.125	89	4.39	274	13.52	330	16.28			
3.81	0.150	102	5.03	305	15.05	365	18.01			
4.45	0.175	117	5.77	338	16.68	412	20.33			
5.08	0.200	121	5.97	361	17.81	435	21.46			
7.62	0.300	154	7.60	465	22.94	528	26.05			
10.16	0.400	182	8.98	515	25.41	569	28.07			
12.70	0.500	220	10.85	624	30.79	617	30.44			

Nota: Hoja de trabajo- CBR 3. Fuente: Autoria propia.

Figura 55

Gráficas CBR 3



PENTRC.	0.1 (*)	0.2 (*)
MOLDE 1	5.88	5.69
MOLDE 2	17.55	16.96
MOLDE 3	20.51	20.44

	DENS	0.1	0.2	CBR
MOLDE 1	1.671	5.88	5.69	5.88
MOLDE 2	2.056	17.55	16.96	17.55
MOLDE 3	2.119	20.51	20.44	20.51

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. =	12.90%
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. =	9.90%

Nota: Hoja de gráficas- CBR 3. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 56

CBR 4

ENSAYO CBR									
NOMBRE:		ANGEL LEODAN RAMON JARA							
NORMA:		ASTM D1880							
TEMA:		TRABAJO DE TITULACIÓN							

COMPACTACION C B R									
MOLDE	1			2			3		
Altura Molde mm.	120			120			120		
N° Capas	5			5			5		
N°Golp x Capa	10			25			55		
Cond. Muestra	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES	ANTES DE EMPAPAR		DESPUES
P. Húm. + Molde	10190.00		10312.45	11340.00		11453.70	11540.00		11697.29
Peso Molde (gr)	6040.00		6040.00	6700.00		6700.00	6700.00		6700.00
Peso Húmido (gr)	4150.00		4272.45	4640.00		4753.70	4840.00		4997.29
Vol. Molde (cc)	2177.51		2177.51	2264.31		2264.31	2264.31		2264.31
Densidad H.(gr/cc)	1.91		1.96	2.05		2.10	2.14		2.21
Número de Ensayo	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
P.Húmido + Tara	54.81	61.24	52.86	48.80	51.40	71.87	38.70	41.40	60.05
Peso Seco + Tara	49.89	55.43	47.28	44.55	46.89	63.45	35.90	38.19	53.20
Peso Agua (gr)	4.92	5.81	5.58	4.25	4.51	8.42	2.80	3.21	6.85
Peso Tara (gr)	17.29	17.57	17.31	17.29	17.57	17.48	17.42	17.43	17.25
P. Muestra Seca	32.60	37.86	29.97	27.26	29.32	45.97	18.48	20.76	35.95
Cont. Humedad	15.09%	15.35%	18.62%	15.59%	15.38%	18.32%	15.15%	15.46%	19.05%
Cont.Hum.Prom.	15.22%		18.62%	15.49%		18.32%	15.31%		19.05%
DENSIDAD SECA	1.654		1.654	1.774		1.774	1.854		1.854

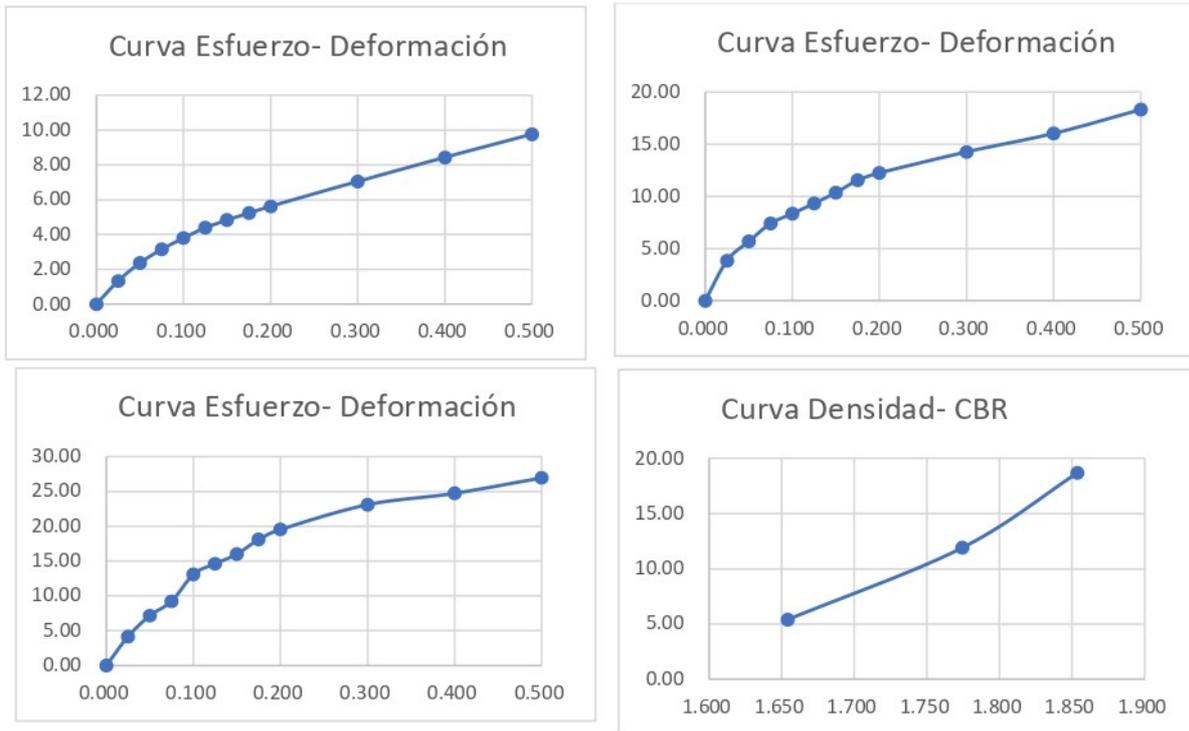
ENSAYO DE HINCHAMIENTO										
TIEMPO		NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE		
ACUMULADO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO	
(Hs)	(Días)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
24	1	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
48	2	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
72	3	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
96	4	1.100	1.100	0.92	1.200	1.200	1.00	1.850	1.850	1.54

ENSAYO CARGA - PENETRACION							
PENETRACION		MOLDE N° 01		MOLDE N° 02		MOLDE N° 03	
(mm)	(pulg)	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO
0.00	0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.64	0.025	27	1.33	78	3.85	84	4.14
1.27	0.050	48	2.37	115	5.67	145	7.15
1.91	0.075	64	3.16	150	7.40	187	9.23
2.54	0.100	77	3.80	169	8.34	265	13.07
3.18	0.125	89	4.39	189	9.32	296	14.60
3.81	0.150	98	4.84	210	10.36	324	15.99
4.45	0.175	106	5.23	234	11.55	367	18.11
5.08	0.200	114	5.62	248	12.24	396	19.54
7.62	0.300	143	7.06	289	14.26	468	23.09
10.16	0.400	171	8.44	325	16.03	501	24.72
12.70	0.500	198	9.77	371	18.30	546	26.94

Nota: Hoja de trabajo- CBR 4. Fuente: Autoria propia.

Figura 57

Gráficas CBR 4



PENTRC.	0.1 (*)	0.2 (*)
MOLDE 1	5.39	5.36
MOLDE 2	11.91	11.65
MOLDE 3	18.68	18.61

	DENS	0.1	0.2	CBR
MOLDE 1	1.654	5.39	5.36	5.39
MOLDE 2	1.774	11.91	11.65	11.91
MOLDE 3	1.854	18.68	18.61	18.68

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. =	17.40%
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. =	10.00%

Nota: Hoja de gráficas- CBR 4. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 58

CBR 5

ENSAYO CBR	
NOMBRE:	ANGEL LEODAN RAMON JARA
NORMA:	ASTM D1880
TEMA:	TRABAJO DE TITULACIÓN

COMPACTACION CBR									
MOLDE	1		2		3				
Altura Molde mm.	120		120		120				
Nº Capas	5		5		5				
NºGolp x Capa	10		25		55				
Cond. Muestra	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES	ANTES DE EMPAPAR	DESPUES			
P. Húm.+ Molde	10190.00	10356.86	11340.00	11419.16	11430.00	11577.90			
Peso Molde (gr)	6040.00	6040.00	6700.00	6700.00	6700.00	6700.00			
Peso Húmedo (gr)	4150.00	4316.86	4640.00	4719.16	4730.00	4877.90			
Vol. Molde (cc)	2177.51	2177.51	2264.31	2264.31	2264.31	2264.31			
Densidad H.(gr/cc)	1.91	1.98	2.05	2.08	2.09	2.15			
Número de Ensayo	1-A	1-B	1-C	2-A	2-B	2-C	3-A	3-B	3-C
P. Húmedo + Tara	54.81	61.24	52.86	48.80	51.40	71.87	38.70	41.40	60.05
Peso Seco + Tara	50.38	55.65	47.28	44.95	47.30	64.45	36.34	38.80	54.20
Peso Agua (gr)	4.43	5.59	5.58	3.85	4.10	7.42	2.36	2.60	5.85
Peso Tara (gr)	17.29	17.57	17.31	17.29	17.57	17.48	17.42	17.43	17.25
P. Muestra Seca	33.09	38.08	29.97	27.66	29.73	46.97	18.92	21.37	36.95
Cont. Humedad	13.39%	14.68%	18.62%	13.92%	13.79%	15.80%	12.47%	12.17%	15.83%
Cont.Hum.Prom.	14.03%		18.62%	13.85%		15.80%	12.32%		15.83%
DENSIDAD SECA	1.671		1.671	1.800		1.800	1.860		1.860

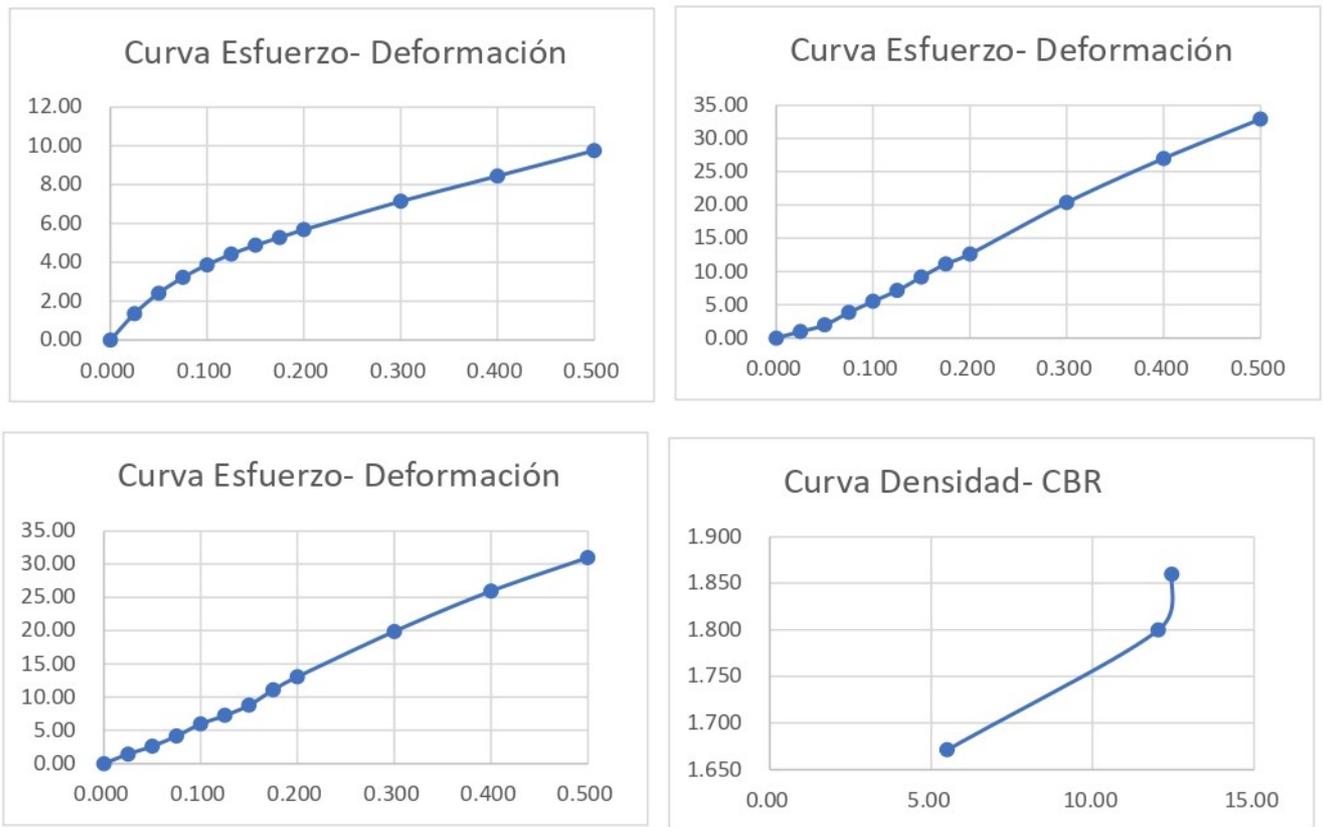
ENSAYO DE HINCHAMIENTO										
TIEMPO ACUMULADO		NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE			NUMERO DE MOLDE		
(Hs)	(Días)	LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO		LECTURA	HINCHAMIENTO	
		DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)	DEFORM.	(mm)	(%)
0	0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
24	1	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
48	2	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
72	3	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00
96	4	1.100	1.100	0.92	1.200	1.200	1.00	1.850	1.850	1.54

ENSAYO CARGA - PENETRACION							
PENETRACION		MOLDE Nº 01		MOLDE Nº 02		MOLDE Nº 03	
(mm)	(pulg)	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO	CARGA	ESFUERZO
0.00	0.000	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.64	0.025	28	1.36	20	0.99	29	1.43
1.27	0.050	49	2.41	40	1.97	53	2.61
1.91	0.075	65	3.22	78	3.85	84	4.14
2.54	0.100	78	3.87	112	5.53	121	5.97
3.18	0.125	90	4.43	145	7.15	147	7.25
3.81	0.150	99	4.88	186	9.18	178	8.78
4.45	0.175	107	5.28	226	11.15	225	11.10
5.08	0.200	115	5.68	256	12.63	265	13.07
7.62	0.300	145	7.14	413	20.38	403	19.88
10.16	0.400	171	8.45	547	26.99	526	25.95
12.70	0.500	198	9.76	667	32.91	628	30.98

Nota: Hoja de trabajo- CBR 5. **Fuente:** Autoria propia.

Figura 59

Gráficas CBR 5



PENTRC.	0.1 (*)	0.2 (*)
MOLDE 1	5.50	5.41
MOLDE 2	7.89	12.03
MOLDE 3	8.53	12.45

	DENS	0.1	0.2	CBR
MOLDE 1	1.671	5.50	5.41	5.50
MOLDE 2	1.800	7.89	12.03	12.03
MOLDE 3	1.860	8.53	12.45	12.45

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. =	11.20%
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. =	10.20%

Nota: Hoja de graficas- CBR 5. **Fuente:** Autoria propia.