



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE
ARCILLAS, MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES (ENSAYOS DE
EXPANSIÓN SIGUIENDO EL MÉTODO DE CBR Y AZUL DE METILENO) CON
EL MÉTODO DE MONITOREO CONTINUO UTILIZANDO SENSORES
ELÉCTRICOS EN IOT”

ELABORADO POR:

ZAMBRANO BORRERO HUGO CÉSAR

ZAMORA MENDOZA KERLY NAYELY

TUTOR(A):

ING. MARCELO FABIÁN OLEAS ESCALANTE, MSc

MANTA – MANABÍ – ECUADOR (2026-1)

APROBACIÓN DEL TUTOR

Como tutor académico de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico lo siguiente:

He supervisado y orientado la elaboración del trabajo de titulación, completando un total de 384 horas, bajo la modalidad de proyecto de investigación. El tema del proyecto se titula “Análisis comparativo de la determinación de la expansión de arcillas, mediante métodos convencionales (ensayos de expansión siguiendo el método CBR y azul de metileno) con el método de monitoreo continuo utilizando sensores eléctricos en IoT”.

Este proyecto ha sido desarrollado conforme a los lineamientos interno de la mencionada modalidad, y ha cumplido con los requisitos establecidos por el Reglamento de Régimen Académico. Por lo tanto, certifico que el proyecto mencionado posee los méritos académicos, científicos y formales necesarios para ser evaluado por el tribunal de titulación designado por la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado corresponde a Hugo César Zambrano Borrero y Kerly Nayely Zamora Mendoza, estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, periodo académico 2026 (1), quienes se encuentran aptos para la sustentación de su trabajo de titulación.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a menos que la ley disponga lo contrario.

Manta, 24 de julio del 2026



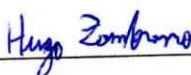
Ing, Marcelo Fabián Oleas Escalante / Tutor / C.C.: 0601809510

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Hugo César Zambrano Borrero con C.C.: 131681285-6, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad de Proyecto de investigación con el tema **“Análisis comparativo de la determinación de la expansión de arcillas, mediante métodos convencionales (ensayos de expansión siguiendo el método de CBR y azul de metileno) con el método de monitoreo continuo utilizando sensores eléctricos en IoT”**, el cual fue dirigido por el tutor Ing. Marcelo Fabián Oleas Escalante.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta a los 24 días del mes de julio del dos mil veinte y seis.



Hugo César Zambrano Borrero

C.C.: 131681285-6

Autor

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Kerly Nayely Zamora Mendoza con C.C.: 135061948-0, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad de Proyecto de investigación con el tema **“Análisis comparativo de la determinación de la expansión de arcillas, mediante métodos convencionales (ensayos de expansión siguiendo el método CBR y azul de metileno) con el método de monitoreo continuo utilizando sensores eléctricos en IoT”**, el cual fue dirigido por el tutor Ing. Marcelo Fabián Oleas Escalante.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta a los 24 días del mes de julio del dos mil veinte y seis.



Kerly Nayely Zamora Mendoza

C.C.: 135061948-0

Autor

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL EXAMINADOR



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación siguiendo la modalidad de Proyecto de Investigación, titulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DETERMINACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES (ENSAYO DE EXPANSIÓN SIGUIENDO EL MÉTODO DE CBR Y AZUL DE METILENO) CON EL MÉTODO DE MONITOREO CONTINUO UTILIZANDO SENSORES ELÉCTRICOS EN IOT”. Elaborado por los Egresados: ZAMBRANO BORRERO HUGO CÉSAR Y ZAMORA MENDOZA KERLY NAYELY de la Carrera de Ingeniería Civil.

INGENIERÍA CIVIL

Aprobado por el Tribunal Examinador



Ing. Jorge García Argandoña
Miembro del Tribunal



Ing. Carmita Jiménez Merchán
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

A mi familia, por ser la estructura sobre la cual se sostiene cada uno de mis pasos.

De manera muy especial, dedico este trabajo a mi madre Rosalía Borrero, cuyo amor incondicional, esfuerzo incansable y fe ciega en mí han sido la verdadera fuerza motriz detrás de este logro. A ella, que lo es todo en mi vida, le debo no solo este título profesional, sino cada principio que guía mi camino.

A mis seres queridos, por ser el refugio constante en los momentos de mayor exigencia y por celebrar a mi lado cada meta alcanzada. Este triunfo no es sólo mío, es de todos ustedes.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, a la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, y a la carrera de Ingeniería Civil, por haberme brindado el espacio académico y la formación profesional para desarrollar este proyecto de titulación.

Un reconocimiento a mi tutor, el Ing. Marcelo Oleas, por su constante orientación, paciencia y criterio técnico durante la supervisión de este trabajo. De igual manera agradezco a cada uno de los ingenieros docentes que, con predisposición y sabiduría, aportaron valiosas recomendaciones que enriquecieron el desarrollo de esta investigación.

Mi gratitud hacia el personal técnico del laboratorio de suelos de la facultad, los ingenieros Javier Bravo y Hugo Panta, cuya experiencia y guía práctica durante las largas jornadas de ensayos fueron fundamentales para la correcta ejecución experimental de esta tesis.

A Bryan Pico, compañero de la carrera de Ingeniería Eléctrica, por su valioso aporte técnico y dedicación en el diseño e implementación del sistema electrónico de la instrumentación.

A mi compañera de tesis, Kerly Zamora, por el trabajo en equipo, la perseverancia y el esfuerzo compartido en cada una de las fases del este proyecto.

Finalmente, extendiendo un profundo agradecimiento a mi familia y a mi madre, quienes, con su respaldo constante, paciencia y comprensión hicieron posible que combinara mis responsabilidades diarias con las exigencias académicas de este proyecto. Su apoyo incondicional en el hogar fue el pilar fundamental para culminar con éxito esta etapa profesional.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme la perseverancia necesaria para culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mis padres, por su amor incondicional, su esfuerzo y sacrificio constante, y por creer en mi incluso en los momentos más difíciles. Este logro es también de ustedes, les debo todo en mi vida.

A mi familia, por su apoyo y palabras de aliento en cada momento de este proceso, y por ser un pilar fundamental en mi vida.

A María José Moreira, por ser esa amiga incondicional que la vida me regaló, gracias por tu apoyo sincero, palabras de aliento en los momentos de duda y por celebrar conmigo cada pequeño logro como si fuera propio. Tu amistad ha sido una de las mayores fortunas de este camino.

A Ramiro Sánchez, por ser un gran amigo incondicional, gracias por estar presente en los momentos difíciles de la carrera y convertirlos en alegría y optimismo en los días más pesados de la carrera. Tu compañía y apoyo constante han dejado una huella en esta etapa de mi vida.

Y a todas las personas que, de una u otra forma, estuvieron en este proceso y me impulsaron a no rendirme y a seguir adelante hasta alcanzar esta meta.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Mbabí, por abrirme sus puertas y brindarme los conocimientos y herramientas necesarias para mi formación profesional.

A la facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, junto a la carrera de Ingeniería Civil por el respaldo académico y los recursos brindados durante mi proceso de formación. También a mis docentes, por compartir su conocimiento, experiencia y dedicación.

A mi tutor, Ing. Marcelo Oleas, por su guía, paciencia y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo de titulación, y por su disposición constante para resolver dudas y orientarnos en cada etapa de esta fase.

A mi compañero de tesis, Hugo Zambrano, por el esfuerzo compartido, el compromiso y el trabajo en equipo que hicieron posible culminar este proyecto.

A Brayan Pico, estudiante de Ingeniería Eléctrica, y a su tutor el Ingeniero Carlo Cano, de parte de Ingeniería Eléctrica, por su valiosa colaboración y aporte técnico en este trabajo.

Al ingeniero Javier Bravo y Hugo Panta, por su valiosa ayuda y disposición en el laboratorio de suelos, fundamentales para el desarrollo de los ensayos de este trabajo

Y un agradecimiento en general a Dios, a mis padres, familia y amigos, por el apoyo incondicional, paciencia y amor, los cuales fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

SÍNTESIS

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo evaluar el potencial expansivo de los suelos arcillosos en la Vía Circunvalación de la ciudad de Manta, comparando los resultados arrojados por ensayos geotécnicos convencionales frente a un sistema de monitoreo continuo mediante instrumentación electrónica. Para el desarrollo experimental, se extrajeron muestras alteradas en tres puntos críticos del tramo vial, a las cuales se les aplicó una caracterización física integral (granulometría por lavado, límites de Atterberg y Proctor modificado). Posteriormente, se determinó la reactividad química del suelo mediante el Valor de Azul de Metileno (VBM) y se cuantificó la deformación volumétrica a través del ensayo de inmersión CBR durante 96 horas, registrando el hinchamiento de forma paralela con un dial mecánico tradicional y un sensor de desplazamiento lineal electrónico.

Los resultados demostraron que los estratos subyacentes corresponden a arcillas inorgánicas de alta plasticidad (clasificadas como CH y MH-CH, grupos A-7), evidenciando un comportamiento altamente expansivo al alcanzar un hinchamiento máximo de 12.43% y valores críticos de adsorción química de hasta 135 mg/g, superando los umbrales normativos de seguridad vial. Finalmente, el análisis comparativo determinó una proximidad superior al 90% entre las lecturas del dial y el sensor electrónico, validando la confiabilidad técnica de la instrumentación continua para el registro dinámico de deformaciones en la práctica geotécnica.

Palabras clave: arcillas expansivas, ensayo CBR, azul de metileno, monitoreo geotécnico, límites de Atterberg.

ABSTRACT

The present research project aimed to evaluate the expansion potential of clay soils on the Circunvalación road in the city of Manta, comparing the results yielded by conventional geotechnical tests against a continuous monitoring system using electronic instrumentation. For the experimental development, disturbed samples were extracted at three critical points along the road section, which underwent comprehensive physical characterization (wash granulometry, Atterberg limits, and modified Proctor). Subsequently, the chemical reactivity of the soil was determined using the Methylene Blue Value (MBV), and the volumetric deformation was quantified through the CBR immersion test for 96 hours, recording the swelling simultaneously with a traditional mechanical dial and an electronic linear displacement sensor.

The results demonstrated that the underlying strata correspond to highly plastic inorganic clays (classified as CH and MH-CH, A-7 groups), exhibiting a highly expansive behavior by reaching a maximum swelling of 12.43% and critical chemical adsorption values of up to 135 mg/g, exceeding normative road safety thresholds. Finally, the comparative analysis determined a proximity of over 90% between the readings of the dial and the electronic sensor, validating the technical reliability of continuous instrumentation for the dynamic recording of deformations in geotechnical practice.

Keywords: Expansive clays, CBR test, Methylene blue, Geotechnical monitoring, Atterberg limits.

ÍNDICE

APROBACIÓN DEL TUTOR	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VII
SÍNTESIS	X
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XVII
ÍNDICE DE TABLAS	XX
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I – MEMORIA DESCRIPTIVA	3
1.1. Tema	3
1.2. Título	3
1.3. Planteamiento del problema	3
1.4. Delimitación del problema	4
1.5. Justificación	5
1.6. Objetivos.....	6
1.6.1. Objetivo general	6
1.6.2. Objetivos específicos	6
1.7. Hipótesis	6
1.8. Variables de estudio	7
1.8.1. Variable independiente	7

1.8.2.	Variable dependiente.....	7
2.	CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE	8
2.1.	Antecedentes.....	8
2.2.	Fundamentos teóricos de la mecánica de suelos	12
2.2.1.	Origen, formación y clasificación de los suelos	12
2.2.2.	Estados de consistencia y límites de Atterberg.....	13
2.2.2.1.	Límite líquido (LL).....	13
2.2.2.2.	Límite plástico (LP).....	14
2.2.2.3.	Límite de contracción (LC)	14
2.2.2.4.	Índice de plasticidad (IP).....	14
2.2.3.	Clasificación de suelos	15
2.2.3.1.	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	15
2.2.3.2.	Clasificación de suelos por el método AASHTO	16
2.2.4.	Mecánica de suelos no saturados y el fenómeno de la succión.	18
2.2.5.	Composición mineralógica.	20
2.2.6.	Comportamiento volumétrico: expansión y contracción.....	22
2.2.7.	Factores que influyen en el potencial de hinchamiento.....	23
2.2.7.1.	Características del suelo	23
2.2.7.2.	Condiciones ambientales	23
2.2.7.3.	Fenómeno de la succión	24
2.2.7.4.	Topografía del terreno	24
2.2.7.5.	Estado de esfuerzos	24

2.3.	Métodos convencionales para la evaluación geotécnica	25
2.3.1.	Ensayo de Proctor Modificado ASTM D155	25
2.3.2.	Ensayo de expansión bajo inmersión (método CBR).....	28
2.3.3.	Ensayo de azul de metileno	29
2.4.	Instrumentación del IoT.....	32
2.4.1.	Raspberry pi 4 model b.....	33
2.4.2.	Convertidor acdc m5.	33
2.4.3.	Sensor de desplazamiento Lineal.	34
2.4.4.	Fuentes de 12v, 5v y 3amp.	34
2.4.5.	Función de TARE electrónica.....	35
2.4.6.	Dashboard web.	35
3.	CAPÍTULO III – DISEÑO METODOLÓGICO.....	36
3.1.	Obtención de muestras para caracterización	36
3.2.	Contenido de humedad	37
3.3.	Granulometría por lavado	39
3.4.	Límites de Atterberg	40
3.4.1.	Límite líquido	40
3.4.2.	Límite plástico	42
3.4.3.	Límite de contracción	44
3.5.	Ensayo de Proctor modificado.....	46
3.6.	Ensayo de expansión siguiendo el método CBR.....	48
3.7.	Ensayo de Azul de metileno.	51

3.8.	Procedimiento para la aplicación de la Instrumentación del sensor IoT.	53
4.	CACPÍTULO IV – CÁLCULOS Y RESULTADOS.....	56
4.1.	Resultados de Ensayo de contenido de humedad	56
4.2.	Resultados de Ensayo de granulometría por lavado	56
4.3.	Resultados de Ensayo para determinar los límites de Atterberg	56
4.3.1.	Límites de Atterberg de la muestra 1	56
4.3.2.	Límites de Atterberg de la muestra 2	58
4.3.3.	Límites de Atterberg de la muestra 3	59
4.3.4.	Clasificación de suelos según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).	60
4.3.5.	Clasificación de suelos según el sistema de clasificación de suelos AASHTO.	61
4.4.	Resultados del ensayo de límite de contracción	61
4.5.	Resultados ensayo Proctor modificado.	62
4.5.1.	Proctor muestra 1	62
4.5.2.	Proctor muestra 2.....	64
4.5.3.	Proctor muestra 3	66
4.6.	Resultados del ensayo de azul de metileno.	67
4.7.	Resultados del ensayo de expansión siguiendo el método de CBR	68
4.7.1.	Monitoreo con Dial.....	68
4.7.2.	Porcentaje de hinchamiento.....	71
4.8.	Resultados de expansión medido con sensor en IoT	71

CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES	75
5. CAPÍTULO 6 – RECOMENDACIONES.....	81
6. BIBLIOGRAFÍA	83
7. ANEXOS.....	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Cambios volumétricos en la Vía Circunvalación cerca de la ciudadela Sariland.....	9
Ilustración 2. Estados de consistencia del suelo. Fuente:	13
Ilustración 3. Gráfica de plasticidad del SUCS. Fuente:	16
Ilustración 4. Clasificación de Suelos y Materiales Granulares - MEC 101.	18
Ilustración 5. Montmorillonita.....	21
Ilustración 6. Métodos de Proctor modificado	26
Ilustración 7. Curva de compactación Proctor modificado.	28
Ilustración 8. Prueba azul de metileno.....	32
Ilustración 9. Ubicación satelital de la toma de muestras en la vía circunvalación	37
Ilustración 10. Extracción de muestras cerca de la ciudadela Sariland.	37
Ilustración 11. Proceso de tamizado y pesado de las muestras.....	38
Ilustración 12. Lavado granulométrico de las muestras.	40
Ilustración 13. Desarrollando ensayo en copa casa grande para la determinación del límite líquido.	42
Ilustración 14. Desarrollando ensayo en copa casa grande para la determinación del límite plástico	43
Ilustración 15. Elaboración del ensayo de límite de contracción en las 3 muestras analizadas.....	46
Ilustración 16. Elaboración del ensayo Proctor, para la obtención de la humedad óptimas en cada una de las muestras.	48
Ilustración 17. Elaboración del ensayo de expansión siguiendo el método CBR	51
Ilustración 18. Elaboración del ensayo azul de metileno.	53
Ilustración 19. Gráfica límite líquido muestra 1.....	57

Ilustración 20. Gráfica límite líquido muestra 1	58
Ilustración 21. Gráfica límite líquido muestra 1	59
Ilustración 22. Gráfica de plasticidad por la normativa SUCS de la muestra 1,2 y 3. ...	60
Ilustración 23. Tabla de datos muestra 1 de la toma de suelo superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad	62
Ilustración 24. Tabla de datos muestra 1 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad	62
Ilustración 25. Tabla de datos muestra 1 del promedio de muestra inferior y superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.	63
Ilustración 26. Gráfica de la curva de compactación muestra 1.	63
Ilustración 27. Tabla de datos muestra 2 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.	64
Ilustración 28. Tabla de datos muestra 2 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad	64
Ilustración 29. Tabla de datos muestra 2 del promedio de muestra inferior y superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.	65
Ilustración 30. Gráfica de la curva de compactación muestra 2.	65
Ilustración 31. Tabla de datos muestra 3 de la toma de suelo superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad	66
Ilustración 32. Tabla de datos muestra 3 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad	66
Ilustración 33. Tabla de datos muestra 3 del promedio de muestra inferior y superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.	66
Ilustración 34. Gráfica curva de compactación muestra 3.	67
Ilustración 35. Gráfica de desplazamiento-expansión muestra 1	69

Ilustración 36.Gráfica de desplazamiento-expansión muestra 2.	70
Ilustración 37.Gráfica de desplazamiento-expansión muestra 3.	70
Ilustración 38.Gráfica de datos del desplazamiento de la muestra 1 medida con el dial.	72
Ilustración 39.Tabla de datos obtenidos por el sensor IoT en el dashboard.	75
Ilustración 40.Gráfica de datos obtenidos por el sensor IoT en el dashboard	75
Ilustración 41.Gráfica comparativa del desplazamiento sensor/dial.	76
Ilustración 42.Instalación del sensor IoT en los moldes CBR.....	86
Ilustración 43.Aplicación (dashboard web) implementada para las lecturas de desplazamiento.	86
Ilustración 44.Sensor IoT de desplazamiento lineal	87
Ilustración 45.Muestra 1 sumergida junto al sensor para el comienzo de la lectura.	87
Ilustración 46.Pruebas en las muestras 1 ,2 y 3 de azul de metileno.....	88
Ilustración 47.Ensayo de Proctor modificado.....	88
Ilustración 48.Prueba de expansión en las muestras 1,2 y 3.	89
Ilustración 49.Resultado límite de contracción y elaboración del ensayo de límite de plasticidad.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la mezcla asfáltica.	
Fuente: Norma INV E235-07	31
Tabla 2. Ubicaciones de las tomas de muestras.	36
Tabla 3. Resultados del contenido de humedad natural de las muestras.	56
Tabla 4. Reultados de ensayo de granulometría por lavado de las muestras.	56
Tabla 5. Resultados de límites de Atterberg de la muestra 1.	56
Tabla 6. Resultados del índice de plasticidad de la muestra 1.	57
Tabla 7. Resultados de límites de Atterberg de la muestra 2	58
Tabla 8. Resultados de índice de plasticidad de la muestra 2.	58
Tabla 9. Resultados de límites de Atterberg de la muestra 3.	59
Tabla 10. Resultados de índice de plasticidad de la muestra 3.	59
Tabla 11. Resultados de la caracterización de las muestras en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.	60
Tabla 12. Resultados de la caracterización de las muestras en el Sistema AASHTO.	61
Tabla 13. Resultados del ensayo del límite de contracción.	61
Tabla 14. Resultados del ensayo de azul de metileno.	67
Tabla 15. Lecturas registradas con el dial en pulgadas durante el proceso de expansión de las muestras.	68
Tabla 16. Lecturas registradas con el dial en milímetros durante el proceso de expansión de las muestras.	68
Tabla 17. Resultados del porcentaje de hinchamiento de las muestras.	71
Tabla 18. Resultados del desplazamiento de la muestra 1 medida con el dial.	71

INTRODUCCIÓN

El suelo es un elemento esencial dentro de la ingeniería civil, pues este proporciona el soporte para la construcción de estructuras, por lo que es necesario comprender su comportamiento, sus propiedades físicas y condiciones que aseguren una buena durabilidad, resistencia y estabilidad. El análisis del comportamiento que tienen los suelos es indispensable sobre todo cuando la base sobre la que se va a trabajar contiene materiales como las arcillas expansivas.

Generalmente, la determinación de la capacidad de expansión de las partículas de un suelo ha sido a base de ensayos tradicionales en laboratorio estandarizados, uno de estos es el ensayo de CBR (California Bearing Ratio) y la evaluación química a través del azul de metileno. Estas son dos de las pruebas más usadas en laboratorios de ingeniería civil, son normados y globalmente aprobados, sin embargo, suelen tener algunas dificultades.

Tomando en cuenta estas limitaciones, se presenta la necesidad de innovar en los métodos de obtención de resultados, proponiendo un monitoreo continuo con sensores eléctricos que permiten llevar un registro constante de la deformación del suelo. El trabajo aquí expuesto tiene el objetivo de hacer una comparación en el análisis de la determinación de la expansión de arcillas mediante los ensayos tradicionales y a través del monitoreo continuo.

Para el desarrollo del proyecto, se trabajará con seis muestras, extraídas de tres puntos a los costados de la vía circunvalación de la ciudad de Manta, Manabí. El proceso se llevará a cabo mediante los ensayos de proctor modificado para encontrar la humedad requerida y realizar el ensayo de expansividad siguiendo el método CBR para

luego hacer el de azul de metileno y tener una idea clara de la capacidad de expansión del suelo tratado.

Los resultados que arrojen los ensayos serán comparados con los registros que tome el análisis constante con los sensores eléctricos, los cuales serán diseñados y puestos en práctica de forma paralela desde la ingeniería eléctrica, con la finalidad de definir una correlación técnica. En resumen, el trabajo pretende verificar la confiabilidad de los sensores eléctricos versus los ensayos normados tradicionales, agregando información a los métodos de análisis en la ingeniería civil para la creación de cimentaciones viables y duraderas.

1. CAPÍTULO I – MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1.Tema

Arcillas expansivas

1.2. Título

Análisis comparativo de la determinación de la expansión de arcillas mediante métodos convencionales (ensayo de expansividad siguiendo el método CBR y azul de metileno) con el método de monitoreo continuo utilizando sensores eléctricos en IoT.

1.3. Planteamiento del problema

El diseño y ejecución de obras civiles enfrenta grandes retos geotécnicos cuando la cimentación debe interactuar con suelos problemáticos, siendo uno de estos los suelos con arcillas expansivas. La principal característica de estos terrenos es su inestabilidad volumétrica; es decir, sufren fuertes procesos de expansión al entrar en contacto con la humedad y grandes contracciones en periodos de evaporación, convirtiéndolos en un factor de alto riesgo que compromete la integridad de las estructuras a nivel mundial.

En dicha problemática el estudio del flujo del agua en el suelo resulta fundamental, ya que ello implica variaciones en el grado de saturación y sus consecuentes cambios volumétricos; tal es el caso de las arcillas montmorilonitas debido a su capacidad para absorber grandes cantidades de agua respecto a su masa inicial, lo que se ve reflejado en esfuerzos sobre la losa de cimentación debido a agrietamientos y daños debido a la distorsión (Li & Cameron, 2002).

Aunque la ingeniería civil cuenta con procedimientos tradicionales para identificar la expansión, como los ensayos de CBR y azul de metileno, su principal problema es la incapacidad de registrar las alteraciones volumétricas en tiempo real durante el proceso de hidratación. Esta limitación motiva el presente estudio, el cual propone comparar los

datos arrojados por la metodología convencional de los ensayos de ingeniería civil frente a un sistema de medición continua mediante sensores en IoT. El objetivo de este proyecto es evaluar la confiabilidad de los dispositivos eléctricos para registrar el comportamiento del suelo con una eficacia igual o superior a la de los métodos de laboratorio comunes.

Conforme a lo anteriormente expuesto, la presente investigación busca dar respuesta a la interrogante ¿Cuál es el grado de similitud y confiabilidad que existe entre los resultados de expansión de arcillas obtenidos mediante métodos geotécnicos convencionales (ensayos de expansión siguiendo el método CBR y azul de metileno) y los datos registrados a través de un sistema de monitoreo continuo con sensores eléctricos en IoT? Despejar esta duda permitirá validar si la instrumentación tecnológica representa una alternativa viable frente a los ensayos comunes de laboratorios de ingeniería civil.

1.4. Delimitación del problema

Para establecer la delimitación de esta investigación, el alcance del presente trabajo se basa en la evaluación de la expansión del material arcilloso mediante métodos estandarizados de laboratorio. Está claro que el objetivo general plantea una comparación con un sistema de monitoreo continuo, el diseño, programación e instrumentación de la parte eléctrica está a cargo, de forma paralela, por el estudiante Bryan Pico de la carrera de ingeniería eléctrica. Por esto, la responsabilidad del estudio desde la ingeniería civil radica en la ejecución de las pruebas convencionales, las cuales servirán como punto de partida para la posterior comparación con la metodología tecnológica.

El proyecto de investigación delimita su área de estudio a la vía Circunvalación, en tres puntos estratégicos seleccionados por la observación directa de sectores donde la

carretera sufre deformaciones prominentes. El alcance experimental se limitará a la caracterización geotécnica y evaluación expansiva mediante la ejecución de los ensayos convencionales en el laboratorio de suelos.

1.5. Justificación

Desde el punto de vista de la durabilidad de las infraestructuras, los cambios volumétricos en los suelos arcillosos precisan complementar con nuevas herramientas los métodos de evaluación vigentes. El presente trabajo aporta un valor metodológico significativo al proponer una relación entre la fiabilidad histórica de los ensayos convencionales y la innovación tecnológica que traen consigo los sensores eléctricos. Establecer una comparación entre las pruebas físicas y químicas de laboratorio frente al dinamismo que ofrece la instrumentación contemporánea, aporta a la ingeniería civil más información sobre el suelo para establecer criterios de diseño más precisos al predecir deformaciones, disminuyendo el riesgo de colapsos o agrietamientos.

Finalmente, la importancia de este proyecto se basa en analizar una problemática con consecuencias negativas en la economía de la sociedad. Las patologías que afectan la funcionalidad de las estructuras demuestran que, en la práctica, los diseños que toman como base los parámetros estáticos, a veces, se quedan cortos ante las condiciones dinámicas del ambiente. Al demostrar la confiabilidad de la tecnología IoT mediante el respaldo normativo de los ensayos de ingeniería civil, se promueve una evolución hacia diseños más efectivos. El día de mañana, esto significa un impacto económico positivo en el ahorro de presupuesto y materiales, alargando la vida útil de la estructura y asegurando vías estables para los usuarios.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Comparar la medición de expansión en suelos arcillosos mediante ensayos convencionales (CBR y azul de metileno) frente a un sistema de monitoreo continuo IoT, para validar la confiabilidad de esta tecnología en la predicción del comportamiento geotécnico.

1.6.2. Objetivos específicos

- Clasificar el suelo objeto de estudio bajo los sistemas SUCS y AASHTO a partir de los límites de Atterberg obtenidos en el laboratorio.
- Establecer los índices de humedad óptima y densidad máxima en las muestras obtenidas de los taludes aledaños a las zonas más afectadas de la vía Circunvalación, utilizando el procedimiento normado de Proctor modificado.
- Medir la expansividad de las partículas arcillosas ejecutando los procedimientos tradicionales como el ensayo de expansividad siguiendo el método CBR y azul de metileno en el laboratorio de suelos.
- Determinar el hinchamiento de las muestras mediante ensayos de expansividad siguiendo el método CBR, con el fin de seleccionar la muestra que presente mayor porcentaje de hinchamiento para el monitoreo con el sensor electrónico.
- Analizar el nivel de proximidad entre los resultados arrojados por los ensayos clásicos y las lecturas de los sensores eléctricos, para determinar la confiabilidad de estos últimos.

1.7. Hipótesis

El uso de un sistema de monitoreo continuo con sensores eléctricos en IoT permite medir la expansión de los suelos arcillosos con un nivel de precisión similar al de los

ensayos convencionales (ensayo de expansión siguiendo el método CBR y azul de metileno), con la ventaja de obtener datos de la deformación volumétrica en tiempo real.

1.8. Variables de estudio

1.8.1. Variable independiente

La vía de análisis para determinar la expansividad del material extraído del terreno (metodología clásica de laboratorio frente a la instrumentación electrónica).

1.8.2. Variable dependiente

Magnitud de la expansión o deformación volumétrica del suelo arcilloso y el nivel de precisión de los datos obtenidos.

2. CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes

En todo el mundo, el comportamiento irregular de las arcillas expansivas representa uno de los mayores desafíos en el campo de la ingeniería civil. Gracias a su capacidad de sufrir severos cambios volumétricos, debido a los cambios de humedad, estos tipos de suelos generan tensiones que, a menudo, superan la resistencia de las cimentaciones. Este comportamiento provoca la aparición de patologías críticas en muchas estructuras como viviendas, edificaciones, redes viales, puentes y demás. Como consecuencia de estos daños, los gobiernos y el sector privado sufren anualmente pérdidas económicas muy elevadas que salen de las reparaciones constantes y de la reducción de la vida útil de las obras.

A nivel nacional, este tipo de suelos representa un obstáculo para el desarrollo urbano y vial. En varias provincias del Ecuador, haciendo énfasis en la región Costa, es común encontrar deformaciones gracias a suelos expansivos arcillosos que ponen en riesgo el correcto funcionamiento de las vías y cimentaciones superficiales. Lidar con estos materiales y las variaciones de intensas lluvias seguidas de extensos periodos de sequía exige que los ingenieros enfoquen su diseño a una topografía y geología alterable.

En el país hay varios tipos de suelos, algunos son preferentemente agrícolas, lo que obliga a hacer las construcciones por debajo de la capa vegetal y según eso se determina qué tipo de construcción se puede levantar sobre ese suelo. Se detalla y señala que, en algunas zonas agrícolas, Tosagua, Chone, Calceta el suelo es de arcilla limosa o arena limosa, que los suelos en general tienen su particularidad, y que ésta debe ser determinada cuidadosamente si se está pensando construir (ABC Architectural Solutions, 2018).

Esta problemática se refleja de manera evidente en la ciudad de Manta, específicamente en la vía circunvalación desde la ciudadela Sariland, hasta el edificio del Registro Civil del cantón. En este tramo, la interacción del clima marino y la composición del suelo generan deformaciones, agrietamientos y levantamientos en el pavimento que ponen en riesgo a los usuarios. Las consecuencias de los fallos estructurales en la carretera sugieren que en el terreno está conformado en gran parte por arcilla con un alto índice de expansividad, esto hace que esta vía sea un punto de interés para el presente proyecto.



Ilustración 1. Cambios volumétricos en la Vía Circunvalación cerca de la ciudadela Sariland

Ensayos como el de expansividad siguiendo el método CBR y azul de metileno son indispensables para el diseño, pero su naturaleza estática no permite el estudio temporal de las deformaciones. Este es el punto en el que la instrumentación tecnológica en tiempo real da una herramienta de ayuda para el análisis. La necesidad de prever los cambios volumétricos de forma dinámica justifica el uso de nuevas formas de evaluación de estos suelos, como los sensores continuos, con el propósito de determinar si estas innovaciones pueden complementar o, incluso, mejorar la predicción de los procedimientos tradicionales.

- ✚ (Intriago, 2026).” Intervención urgente ante socavón en vía Circunvalación por lluvias intensas”. En marzo de 2026 se reportó un socavón en la vía Circunvalación de Manta, sector Sariland, provocado por precipitaciones intensas, así como deslizamientos en los kilómetros 19,22 y 24 del mismo tramo. Esto evidencia la vulnerabilidad geotécnica de esta vía ante eventos pluviométricos. Este tipo de afectaciones se relaciona con características particulares de los suelos de la ciudad, ya que estudios previos han identificado la presencia de suelos dispersivos y colapsables en el cantón Manta, cuyo comportamiento representa un riesgo significativo para la estabilidad de obras civiles y viales.
- ✚ (Espinoza A. , 2015). “Caracterización de arcillas expansivas en el sector Salapa”. El estudio se centró en el análisis de las propiedades expansivas que poseen los suelos en el sector Salapa, con la finalidad de determinar la caracterización del estudio, su comportamiento como suelo para cimentación en la construcción de obras civiles y establecer soluciones factibles ante la presencia de materiales expansivos como base de cimentación para cualquier tipo de estructuras. Las muestras ensayadas se basaron en la ubicación y delimitación de la zona de estudio, obteniendo muestras alteradas a una profundidad media de 1.5 m. El trabajo se caracterizó e identificó mediante ensayos de laboratorio, las propiedades de los suelos expansivos para el posterior análisis de su comportamiento.
- ✚ (Machuca Mena & Santillán Goya, 2024), “Caracterización del grado de expansión de las arcillas del sector “El Cerro” en el tramo de vía Rocafuerte-Tosagua KM 184 al Km 188 y su afectación a la infraestructura vial”, donde se identificó la presencia de arcillolitas de color café oscuro compuestas

principalmente por arcillas illita, mineral de alta reactividad frente al agua.

Esta condición genera problemas recurrentes en la vía, como baches, hundimientos y deformaciones, que demandan mantenimientos continuos.

Para caracterizar el comportamiento el autor aplicó el ensayo de valor de azul de metileno junto con límites de Atterberg, ensayo Proctor e hinchamiento y expansión controlada, con el fin de determinar la plasticidad, capacidad de compactación y tendencia al hinchamiento de arcillas.

✚ (Paspuel, 2024). “Análisis de la propagación y distorsión de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua mediante procesamiento computacional de señales”. Este estudio aborda el análisis del comportamiento mecánico y la propagación de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua bajo condiciones controladas de humedad (0%, 5%, 10% y 15%). Mediante ensayos experimentales, se evaluaron la resistencia a compresión no confinada, los módulos elásticos y las características de propagación de señales eléctricas (amplitud, frecuencia y distorsión). Los datos se procesaron utilizando técnicas computacionales y análisis estadístico, desarrollando modelos predictivos que correlacionan propiedades mecánicas y eléctricas.

2.2. Fundamentos teóricos de la mecánica de suelos

2.2.1. Origen, formación y clasificación de los suelos

En la ingeniería civil, el suelo se define como una acumulación de partículas provenientes de las rocas gracias a diferentes procesos como la erosión, meteorización física y química o la temperatura. Estos agentes formativos son los que le dan el tamaño y mecánica al material por formarse. Estas partículas pueden permanecer en el mismo lugar donde fueron creadas para dar paso a los suelos residuales o ser transportadas por aire o agua para depositarse en nuevas zonas para formar los suelos transportados. Este proceso le da al suelo una estructura compuesta por partículas de roca, aire y agua que es el lecho donde se asienta toda estructura civil.

Para predecir la respuesta del terreno cuando se enfrentan al peso de las estructuras, la ingeniería civil basaba sus datos principalmente en el escenario donde el suelo estaba completamente saturado. Como definición, se dice que un suelo es totalmente saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por agua. Un suelo en tal circunstancia consta, como caso particular de solo dos fases, la sólida y la líquida (Duque Escobar & Escobar Potes, 2023). Por otro lado, en la práctica, no se puede asumir que el terreno está permanentemente saturado porque no se toman en cuenta las variaciones climáticas que lo harían mudar de la saturación total.

Suelos colapsables, residuales y expansivos, pertenecen al grupo de los materiales no saturados. Estos tipos de suelos han sido denominados problemáticos o especiales, debido a que, al estar sujetos a variaciones en su humedad natural, sea por cambios climáticos o por acción del hombre. Los cambios de humedad en este tipo de suelos juegan un papel fundamental tanto en su capacidad portante, como en los cambios volumétricos probables, es por ello la importancia de conocer el comportamiento de los suelos naturales o artificiales no saturados (Espinoza Á., 2015).

2.2.2. Estados de consistencia y límites de Atterberg

En la mecánica de suelos, la respuesta de las arcillas y limos es diferente a la de las arenas y gravas, ya que las primeras son muy susceptibles a la humedad. Por una parte, los suelos gruesos mantienen una resistencia constante, las arcillas sufren alteraciones notorias en su estructura física al entrar en contacto con el agua. Esta propiedad hace que el estudio de la consistencia del terreno sea fundamental, ya que establece la fuerza con la que las partículas se mantienen unidas frente a diferentes niveles de humedad antes de que el estrato comience a sufrir variaciones en su volumen.

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, este puede fluir como un semilíquido. Si el suelo es secado gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua. Estos cambios de estado se denominan límites de Atterberg (Das, 2001).

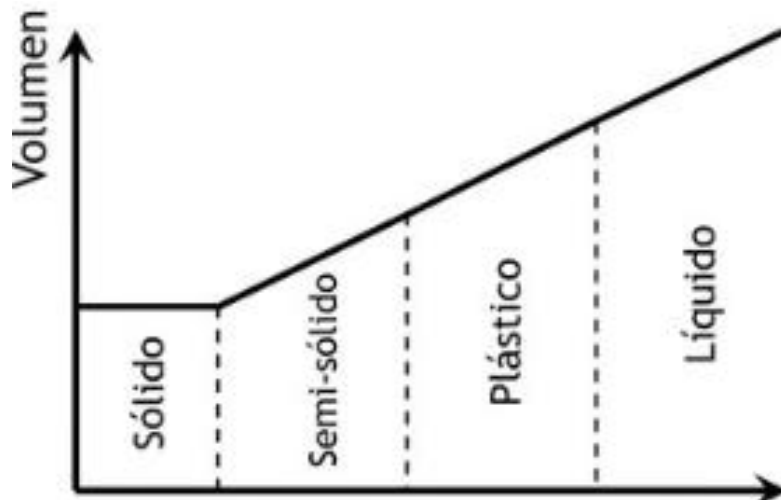


Ilustración 2. Estados de consistencia del suelo.

Fuente: <https://www.ingeotecnica.com/limites-de-consistencia>

2.2.2.1. Límite líquido (LL)

El límite líquido de un suelo es determinado por medio de la copa de Casagrande (Designación de Prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de agua con el cual se cierra la ranura de $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm) mediante 25 golpes. (Das, 2001).

2.2.2.2. Límite plástico (LP)

El límite plástico se define como el contenido de agua con el cual el suelo agrieta al formarse un rollito de 1/8" (3.18 mm) de diámetro (Designación de Prueba D-4318 de la ASTM). Este método de ensayo consiste en determinar el contenido de agua de un suelo en el límite entre su comportamiento plástico y sólido, para lo cual se utiliza el proceso de rolado para evaporar gradualmente el agua hasta que comienza a fisurarse o disgregarse (Das, 2001).

2.2.2.3. Límite de contracción (LC)

El límite de contracción se define como el contenido de agua con el cual el suelo no sufre ningún cambio adicional de volumen con la pérdida de agua (Designación de Prueba D-427 de la ASTM) (Das, 2001). Y se calcula con la siguiente fórmula:

$$LC = w_1 - \left[\frac{(V_i - V_f) * \rho_w}{m_s} \right] * 100$$

Donde:

LC = Límite de contracción,

w_1 = humedad inicial,

V_i = volumen inicial,

V_f = volumen final,

ρ_w = densidad del agua.

2.2.2.4. Índice de plasticidad (IP)

La diferencia entre el límite líquido y el plástico de un suelo se define como índice de plasticidad (IP) (Das, 2001), o

$$IP = LL - LP$$

2.2.3. Clasificación de suelos

Atendiendo a la gran diversidad que los terrenos ofrecen respecto a tipo de suelos, el estudio de estos requiere de sistemas de clasificación estandarizados que permitan agrupar los materiales según sus características físicas y mecánicas. Encasillar un suelo no es un proceso cualitativo, es una herramienta que ayuda a predecir el comportamiento, que usa la distribución de tamaño de partículas (granulometría) y los índices de plasticidad para categorizar el suelo en un grupo que guarde similitudes con el mismo, con el objetivo de simplificar la toma de decisiones acerca de la aptitud de un estrato para soportar cargas estructurales.

2.2.3.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), propuestos originalmente por Arthur Casagrande y adoptado luego por normativas internacionales como la ASTM (American Society for Testing and Materials), representa el lenguaje universal en la ingeniería civil para el diseño de cimentaciones. El objetivo de este método de clasificación es agrupar los materiales en categorías que representen su respuesta mecánica a las cargas estructurales, usando una nomenclatura alfabética que resulta intuitiva para los ingenieros encargados del diseño. Para lograr esta categorización, el método define un proceso de separación estricto que inicia analizando el tamaño de las partículas que conforman la muestra.

La primera y más importante decisión está dada por el contenido de finos, definido como el correspondiente a partículas de diámetro equivalente menor a 0,075 mm, pasante del tamiz #200. Si menos del 50% en peso del suelo pasa el tamiz #200, entonces el suelo es “grueso” y se subclasifica en arena o grava usando el tamiz #4. De otro modo, el suelo es “fino” y se subclasifica en limo o arcilla, usando los límites de plasticidad (Santamarina & Narsilio, 2010).

Si el material extraído pasa más del 50% las aberturas del tamiz #200, se determina que el terreno es de suelo fino y pasa a analizarse en un segundo filtro, la respuesta se obtiene por las fuerzas de cohesión de las partículas. El sistema requiere correlacionar la respuesta del suelo frente a la humedad usando sus límites de consistencia. Así, la normativa asegura la identificación de los estratos de manera correcta.

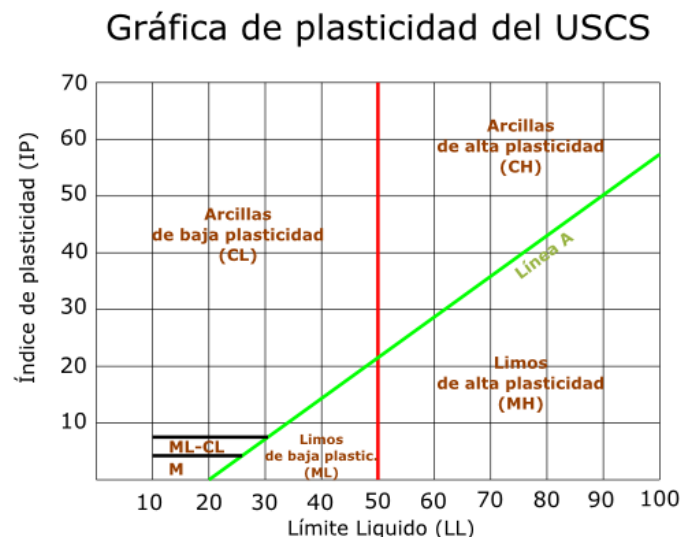


Ilustración 3. Gráfica de plasticidad del SUCS.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Unificado_de_Clasificaci%C3%B3n_de_Suelos

2.2.3.2. Clasificación de suelos por el método AASHTO

La amplia variedad de escenarios geotécnicos que suele presentar un suelo obliga al diseñador a la evaluación de los estratos bajo la normativa enfocadas en el diseño de pavimentos. A diferencia de las estructuras puntuales, una vía funciona gracias al trabajo en conjunto de varias capas una sobre otra y su correcto desempeño está dado por la calidad de materiales usados en ellas. Para garantizar la durabilidad y seguridad de las vías, se desarrolló un método de análisis para predecir el comportamiento de los diferentes tipos de suelo a las cargas.

El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (Designación ASTM D-3282; método AASHTO M145) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928. Este sistema pasó por varias revisiones y actualmente es usado

para propósitos ingenieriles enfocados más en el campo de las carreteras como la construcción de los terraplenes, subrasantes, subbases y bases de las carreteras (Urdanivia, 2019).

Para clasificar un suelo usando el método AASHTO, la normativa indica que el proceso es de eliminación secuencial basado en dos pilares: granulometría y los límites de Atterberg. El análisis granulométrico dicta que si el porcentaje del material que pasa el tamiz #200 es inferior al 35%, el suelo es considerado grueso, abarcando los grupos A-1, A-2 y A-3. Por otro lado, si más del 35% del suelo pasa el tamiz #200, se toma como un suelo fino y engloba a los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. En la última categoría se usa el límite líquido y el índice de plasticidad para terminar de clasificar el material.

El grupo A-7 es el escenario más crítico para la ingeniería civil en la construcción de vías. Al encasillar a los suelos de partículas finas que tienen un límite líquido e índice de plasticidad elevados, la norma analiza individualmente a las arcillas propensas a grandes cambios volumétricos. Clasificar al terreno de base como parte del grupo A-7 es una señal de alerta, indica que el material sufrirá expansiones y contracciones severas al saturarse y salir de ese estado, poniendo en riesgo la integridad de las capas que conformen la vía si no se las coloca con un tratamiento previo.

Clasificación General	Material Granular							Material limo arcillosos			
Grupos	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5 A-7-6
% pasante #10 #40 #200	50% máx 30% máx 15% máx	50% máx 25% máx	35% máx	35% máx	35% máx	35% máx	51% mín 10% máx	36% mín	36% mín	36% mín	36% mín
Características del material que pasa por el tamiz #40 LL Ip Ig	6% máx	6% máx	40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín	N.P. 0	40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín 20 máx
Tipo de material	Fragmentos pétreos de gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina	Suelos limosos		Suelos arcillosos	

Fuente: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-santa/mecanica-de-suelos-i/mecanica-de-suelos/111376459?sid=%24device%3A18786d2e0d45eb-0e13efd6ac457b-26031b51-100200-18786d2e0d5b191784668700>

2.2.4. Mecánica de suelos no saturados y el fenómeno de la succión.

Se define como suelo no saturado al estado del suelo que se encuentra parcialmente saturado por agua, lo cual ocasiona alteraciones en los valores de tensión y presión de poros del suelo. En este contexto, las limitaciones de la mecánica de suelos tradicional son evidentes cuando se necesita explicar las deformaciones en suelos no saturados o de las estructuras apoyadas en esos suelos (pavimentos, taludes, cimentaciones entre otros) sujetos a cargas de servicio o en los estados de tensiones totales presentes in situ. (Soto, 2008).

En este sentido, el estudio pormenorizado del suelo en condiciones de no saturación no suele ser tan habitual como el caso del suelo saturado, en el que únicamente existen dos fases y, por consiguiente, su análisis es más sencillo. Un suelo parcialmente saturado presenta, a igualdad de índice de poros, una mayor resistencia mecánica que en la condición saturada o bien la seca. Este incremento de resistencia se basa en considerar, en primera aproximación, que se genera una fuerza suplementaria entre partículas debida a la ascensión capilar de la fase líquida a través de los intersticios, proporcionando, de este modo, una resistencia adicional que se anula al saturar dicho suelo. (Universidad Politécnica de Cataluña, s. f.).

En concordancia con Soto (2008), el volumen del suelo no saturado se modifica debido a que se encuentra sometido a un estado de tensión diferenciado e influenciado por una componente denominada tensión de succión. La succión puede hacer variar el volumen del suelo, sin embargo, su magnitud, depende de la humedad del medio

poroso. En este contexto, se demuestra que el comportamiento mecánico de estos tipos de suelos está relacionado íntimamente entre la humedad y la succión.

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield en 1935 para representar la deficiencia de presión en el agua de poros de algunos suelos saturados o no saturados, que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba agua a la presión atmosférica. El término succión o potencial de agua designa a la integrante del estado de tensiones que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado tensional y entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado.

Técnicamente, la diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros se define como la succión matricial. El valor depende de la tensión superficial y el radio de curvatura del menisco, cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños donde el radio de curvatura del menisco se reduce y, de esta manera, la succión matricial se incrementa. Debido a los poros pequeños, se desarrollan succiones matriciales más altas en suelos arcillosos más que en los suelos granulares.

Finalmente, los suelos no saturados donde la presión del aire en los poros es atmosférica, el potencial matricial equivale a la succión matricial, la cual se define como el producto del peso unitario de agua por dicho potencial. Bajo ese concepto, la succión osmótica se obtiene al dividir el potencial osmótico para el peso unitario del agua, aplicando también un cambio de signo. La combinación de ambos componentes, matricial y osmótica, constituyen la succión total. No obstante, la evidencia experimental indica que las variaciones volumétricas y la resistencia al corte en el suelo dependen de la succión matricial y no del total; es decir, el comportamiento de tensión-

deformación está ligado a la succión matricial, mientras que el flujo de agua está dado por el gradiente de succión total en conjunto con efectos gravitacionales.

2.2.5. Composición mineralógica.

El comportamiento que muestran los suelos al sufrir las cargas de los automóviles o del clima es la constancia de sus componentes minerales internos. De acuerdo con el grado de meteorización, el material tiene niveles de reactividad diferentes. Las partículas de mayor tamaño, como lo son las arenas, trabajan como agregados estables y sin plasticidad. Sin embargo, a medida que la partícula es de menor tamaño, la composición mineral adquiere propiedades que modifican drásticamente la relación del terreno con la humedad.

La fracción fina activa del suelo, arcilla, representa la actividad actual, el asiento de los fenómenos de cambio, retención y cesión de elementos, el agente más importante en las relaciones suelo-agua, el principal responsable, en fin, de sus propiedades fisicoquímicas. La naturaleza y proporción de la arcilla ejerce, por esta razón, una influencia destacada en todos los caracteres del suelo que interesan desde los aspectos teórico y práctico (Paneque & González, 1957).

A nivel físico-químico, la actividad de la fracción arcillosa es gracias a su morfología laminar y a su enorme superficie específica, características que le dan una gran capacidad de interacción electromagnética con la humedad. Esta reacción está definida por el tipo de material que predomine en el terreno. La cristalografía de suelos divide a estos componentes en tres grupos: la caolinita que es de baja expansividad, la illita que tiene una reacción promedio y la montmorillonita que es la que más modifica su tamaño al entrar en contacto con el agua. Definir cuál a cuál de estos grupos pertenece el suelo es de suma importancia para prevenir los cambios volumétricos que pueda sufrir el suelo.

Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra aluminica, que se superponen infinitamente. La unión entre todas las retículas es lo bastante firme para no permitir la penetración de moléculas de agua, por lo tanto, las arcillas caoliníticas son estables en presencia del agua. Las montmorillonitas están formadas por una lámina aluminica entre dos laminas silícicas, superponiéndose indefinidamente, en este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo tanto, las moléculas de agua pueden entrar en la estructura con facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Por último, las illitas, están formadas análogamente que las montmorillonitas, pero su constitución interna tiende a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen; por ella, su expansibilidad es menor que la de las montmorillonitas, generalmente las arcillas ilíticas se comportan de manera más favorable para el ingeniero. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2001).

Al haber, predominantemente, montmorillonita en el terreno, lo transforma en un material altamente reactivo al enfrentarse a los cambios climáticos. Es esta propiedad de alojar moléculas de agua indefinidamente en sus láminas lo que causa el hinchamiento, un problema geotécnico que obliga al ingeniero a implementar soluciones para contrarrestar la presión y la deformación de las capas.



Ilustración 5. Montmorillonita.

Fuente: <https://ibero.enciclo.es/articulo/montmorillonita>

2.2.6. Comportamiento volumétrico: expansión y contracción

Debido a la presencia de minerales de gran reactividad en la fracción fina, el suelo deja de comportarse estáticamente y pasa a ser un medio dinámico. Este cambio de comportamiento se evidencia mediante cambios volumétricos en el terreno, un fenómeno bidireccional en el que el estrato aumenta su tamaño al entrar en contacto con la humedad y reduce su volumen al desecarse.

Los cambios de humedad que originan la expansión y contracción en un suelo expansivo pueden ser inducidos por cambios climáticos, por la influencia de la temperatura y la vegetación, por la topografía, el tipo de estructura, la cimentación, infraestructura actual de la zona, fugas en tuberías de agua y drenaje, etc; de forma que si la humedad permanece constante, el suelo no presentará cambios volumétricos en su estructura. (Torres, 2005).

El cambio de entre estaciones lluviosas y secas crea un proceso de bombeo natural en la capa subrasante del suelo, en la que el material no recupera sus propiedades elásticas iniciales una vez pasada la deformación. En el laboratorio, con condiciones controladas, los ensayos dejan en evidencia el desgaste físico de la arcilla: Una arcilla que en el consolidómetro se deja expandir completamente y luego se deja secar hasta su contenido de agua inicial para posteriormente saturarse nuevamente, repitiéndose para un número de ciclos, se ha notado que se presentan signos de fatiga después de cada ciclo de secado y saturado (Chen, 1975).

Comprender la mecánica de los ciclos de expansión, contracción y, por consiguiente, fatiga, es el primer paso para garantizar la integridad de la vía. El reto para la ingeniería está en predecir matemáticamente el cambio volumétrico del terreno antes de la construcción de la infraestructura. Este cálculo predictivo de deformación depende de la

presencia de minerales reactivos, así como de los factores externos que actúan como detonantes del evento.

2.2.7. Factores que influyen en el potencial de hinchamiento

La magnitud de la deformación es el resultado de la suma de varios parámetros como las propiedades del material, las alteraciones de su entorno físico, los cambios climáticos y cargas a las que se somete. Para entender la susceptibilidad del suelo y dimensionar su respuesta, es importante analizar la interacción de las condiciones a las que el estrato es sometido.

2.2.7.1. Características del suelo

Estas incluyen las propiedades mineralógicas y químicas del suelo, que determinan la capacidad de contener agua absorbida en su estructura; así como las propiedades de plasticidad y densidad que son un reflejo de los factores a microescala que afectan su comportamiento. Los minerales que típicamente causan cambios en el volumen del suelo con las montmorillonitas y algunas capas de otros minerales mezcladas. Las illitas y caolinitas no son con frecuencia expansivas, pero pueden causar cambios de volumen cuando el tamaño de las partículas es extremadamente fino (menos de una décima de micra) (Torres, 2005).

2.2.7.2. Condiciones ambientales

Estas traen como consecuencia un incremento o decremento en la humedad del suelo y por ende una variación en su volumen; las cuales son correlativas a la variación de la tensión capilar y los esfuerzos efectivos del suelo. En tiempo de estiaje el suelo expansivo experimenta una contracción en su estructura y el espaciamiento entre sus partículas es más cerrado (Torres, 2005).

2.2.7.3. Fenómeno de la succión

Como se profundizó en la sección 2.2.4., la succión es causa del aumento en los esfuerzos intergranulares; cuando en un suelo, como las arcillas, se pierde el agua por un proceso de desecación, se genera el aumento de la succión, provocando la contracción de este. Caso contrario, en épocas de lluvias, el suelo tiene un incremento en la humedad de la estructura, el espaciamiento entre sus partículas es mayor y se dan incrementos en su volumen. En estas condiciones, el potencial de expansión, la capacidad de absorción de agua y la succión disminuyen, hasta llegar a ser prácticamente nulos. La succión del suelo es un factor importante en el control de las propiedades mecánicas de los suelos parcialmente saturados (Torres, 2005).

2.2.7.4. Topografía del terreno

Este es un punto importante para considerar en estructuras cimentadas sobre suelos parcialmente saturados con altos contenidos de mineral montmorillonítico. Es importante proporcionar un buen drenaje al terreno para impedir encharcamientos y acumulaciones de agua que den origen a expansiones volumétricas (Torres, 2005).

2.2.7.5. Estado de esfuerzos

Es un factor decisivo en la expansión o contracción del suelo. La historia geológica de esfuerzos a que el suelo ha estado sometido influye considerablemente en la magnitud del cambio del volumen para una humedad y densidad dada. El suelo deberá estar en equilibrio con los esfuerzos externos a los que está sometido, de lo contrario se da lugar a una modificación del espaciamiento entre las partículas que lo forman para alcanzar dicho equilibrio (Torres, 2005).

2.3. Métodos convencionales para la evaluación geotécnica

Para analizar la susceptibilidad de un suelo a las variaciones de humedad, el estudio de suelos requiere una evaluación doble. Por un lado, es necesario medir la respuesta mecánica y la deformación física del estrato frente a saturaciones controladas; y por otro, se debe cuantificar la actividad química del porcentaje arcilloso del suelo. Estos dos parámetros se pueden corroborar en el laboratorio a través de métodos normados con sus respectivos principios y metodologías.

2.3.1. Ensayo de Proctor Modificado ASTM D155

El ensayo de Proctor en general es un método de laboratorio que mide el proceso y grado de compactación máximo de un suelo, esto con el objetivo de descubrir un punto exacto denominado humedad óptima a raíz de compactar un suelo con diferentes humedades, determinando así la relación densidad seca - humedad de compactación de los materiales a utilizar en una obra.

El Proctor modificado emplea una energía de compactación aproximadamente cinco veces mayor al método estándar, simulando condiciones de carga que exigen mayor peso en el suelo, pues este busca determinar la densidad máxima seca y la humedad óptima bajo idea de que, a mayor energía de compactación, se obtiene un suelo mucho más denso y por lo tanto tendrá mayor resistencia.

La energía de compactación es aproximadamente de $2700 \frac{KN-m}{m^3}$ en el Proctor modificado; para llegar a ello, se debe realizar un estudio de compactación utilizando un molde con un diámetro entre 4 y 6 pulgadas (101.6 a 152.4 mm) y un martillo de 4.536 kg, el cual se debe dejar caer desde una altura de 457 mm. (Tipan Erazo & Tarambís Rodríguez, 2025).

Este ensayo se basa en tres métodos, cada método cuenta con una descripción como el diámetro de molde, peso del martillo, número de golpes, número de capas, entre otros; las cuales serán definidas por el tipo de suelo. Se recomienda un peso mínimo de 5 kg de material, con el fin de que sea suficiente para llevar a cabo la compactación, de acuerdo con la cantidad de muestra se determinara la cantidad de humedad necesaria para lograr una buena compactación del material. (Capcha , Machaca, Sulca , & Avila, 2020)

Descripción	MÉTODO		
	A	B	C
Diámetro de Molde	4"	4"	6"
Peso del Martillo	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de Caída	45.7 cm	45.7 cm	45.7 cm
Nº de Golpes/Capa	25	25	56
Numero de Capas	5	5	5
Energía de Compactación	2,700 KN-m/m ³	2,700 KN-m/m ³	2,700 KN-m/m ³
Material a Usar	Mat que pasa el Tamiz N° 4	Material que pasa el Tamiz 3/8"	Material que pasa el Tamiz 3/4"
Uso	Ret. Tamiz N° 4 ≤ 20%	Ret. Tamiz N° 4 > 20% Ret. Tamiz 3/8" ≤ 20%	Ret. Tamiz 3/8" > 20% Ret. Tamiz 3/4" ≤ 30%

Ilustración 6. Métodos de Proctor modificado

Fuente: <https://es.slideshare.net/slideshow/compactacion-de-suelos-64087392/64087392>

Según la ilustración 6 el método seleccionado depende del material que pasa por los tamices indicados en la misma, es decir, por la granulometría de la muestra. El método "A" se puede utilizar si el 20% o menos en masa del material se retiene en el tamiz n°4. El método "B" se puede usar si el 20% o menos en masa del material se retiene en el tamiz 3/8", y por último el método "C" que puede utilizarse si el 30% o menos en masa del material se retiene en el tamiz 3/4". (Caceres, s, f).

Complementariamente, a raíz de los resultados obtenidos por el Proctor, se elabora la curva de compactación del suelo, la cual representa gráficamente la relación

entre el contenido de humedad (ω) y la densidad seca (γ_d) alcanzada durante el proceso de compactación. Este análisis permite identificar el punto en el que el suelo alcanza su máxima densidad seca bajo una determinada energética de compactación, obteniéndose así el contenido de humedad óptima de la muestra.

2.3.1.1. Curva de compactación de Proctor modificado.

La curva de compactación modificada es la representación gráfica que se obtiene al aplicar el ensayo de Proctor modificado, (Normado por AASTHO 180 o ASTM D1557), en la cual se relaciona la densidad seca del suelo con el contenido de humedad obtenido en las pruebas de laboratorio. Esta curva permite determinar los parámetros fundamentales para un diseño geotécnico como la humedad óptima que es el contenido de agua en el cual el suelo alcanza su máxima densidad seca bajo un esfuerzo de compactación, y la densidad seca máxima, que corresponde al punto más alto de la curva.

A diferencia del Proctor estándar, el ensayo modificado emplea una energía de compactación mayor, una altura de caída superior y un número mayor de capas de compactación dentro del molde, pues este busca a través de la energía simular las condiciones de compactaciones exigidas en obras sometidas a cargas más altas.

La forma de la curva corresponde al comportamiento físico del suelo durante el proceso de compactación. En el tramo ascendente, el incremento de humedad favorece la lubricación de las partículas del suelo, lo cual facilita su reacomodo y permite alcanzar una mayor densidad seca con el mismo esfuerzo de compactación.

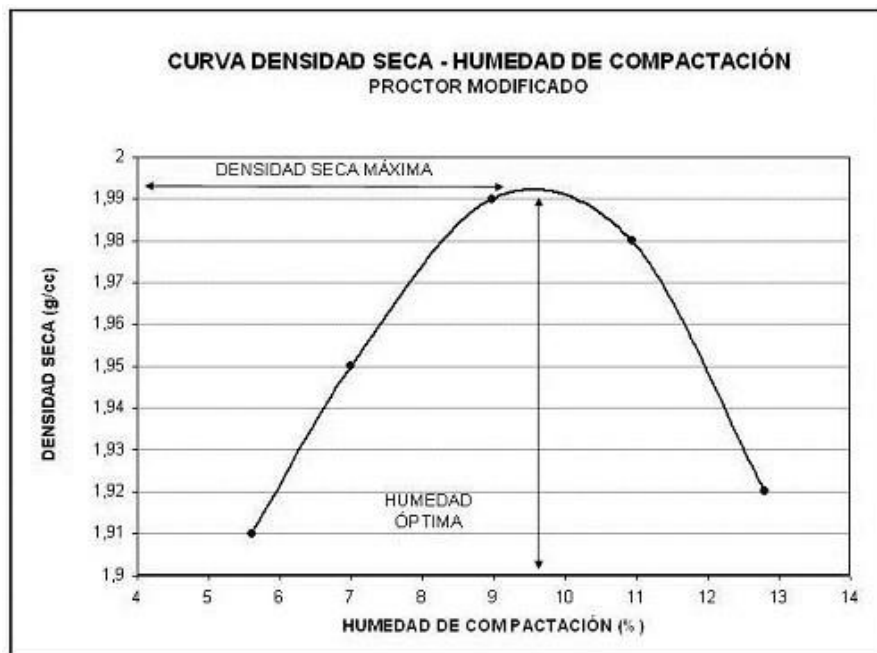


Ilustración 7. Curva de compactación Proctor modificado.

Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2021/03/10/el-ensayo-que-invento-ralph-r-proctor-por-que-es-tan-importante/>

2.3.2. Ensayo de expansión bajo inmersión (método CBR).

El ensayo de expansión bajo inmersión, comúnmente bajo el método CBR (California Bearing Ratio), constituye un proceso bajo las normativas especificadas por ASTM D1883 y ASASHTO T193, cuyo objetivo es determinar el potencial de expansión volumétrica que experimenta una muestra de suelo compactada al ser sometida a un proceso de saturación controlada.

Para la realización del ensayo, muestra de suelo se compacta dentro de un molde cilíndrico metálico siguiendo la energía de compactación especificada, la cual esta generalmente asociada al ensayo de Proctor estándar modificado. Sobre la muestra compactada se coloca un disco perforado junto con pesas de sobrecarga, posteriormente se instala un trípode con un extensómetro que permite registrar las variaciones de altura de la muestra a lo largo del tiempo del ensayo.

Un porcentaje elevado de expansión constituye un indicador de la presencia de suelos potencialmente expansivo, como las arcillas de alta plasticidad, las cuales representan un riesgo considerable para la estabilidad de las estructuras. Estas presiones pueden traducirse en agrietamientos, deformaciones diferenciales, daños estructurales en cimentaciones superficiales, pérdida de servicio en pavimentos, entre otras patologías. La fórmula para determinar el porcentaje de expansión es:

$$PH = \left(\frac{\Delta H}{H} \right)$$

Donde:

PH: Porcentaje de hinchamiento,

ΔH : desplazamiento del dispositivo de medición en mm,

H: altura inicial de la muestra.

Por esta razón, el valor de expansión obtenido se emplea conjuntamente con el valor del soporte CBR para evaluar la aptitud del suelo como subrasante, constituyendo ambos parámetros insumos esenciales dentro de los criterios de diseño de estructuras.

2.3.3. Ensayo de azul de metileno

El potencial de hinchamiento en un suelo está íntimamente relacionado a la mineralogía que componen sus arcillas. Los ensayos de penetración no determinan la composición química de las partículas que componen el estrato, por lo tanto, se han desarrollado metodologías para aplicar pruebas de reactividad directa. El ensayo de azul de metileno se encarga de medir con precisión la susceptibilidad de la muestra a los fluidos, siendo una herramienta que sirve para detectar la presencia de minerales como la montmorillonita, que suelen ser causantes de muchos problemas estructurales en las construcciones.

A nivel molecular, las láminas de los minerales arcillosos como la montmorillonita tienen una carga eléctrica superficial negativa, la cual atrae iones a su alrededor para alcanzar el equilibrio. En este escenario se fundamenta el uso de este químico para el ensayo, ya que “el azul de metileno, al mezclarse con agua, actúa como un colorante catiónico que interactúa con los cationes intercambiables de las arcillas mediante fenómenos de intercambio iónico y adsorción física (Machuca Mena & Santillán Goya, 2024).” Este reemplazo molecular ocurre de manera progresiva; las grandes moléculas orgánicas del reactivo desplazan a los iones naturales que residen entre las capas del suelo, ocupando su lugar hasta cubrir la totalidad de la superficie física disponible.

La capacidad de adsorción de azul de metileno se convierte, por lo tanto, en un indicador crucial de la actividad de las partículas arcillosas. El procedimiento del ensayo consiste en mezclar una muestra del suelo con una solución de azul de metileno de concentración conocida. Durante este proceso, las partículas de arcilla adsorben el azul de metileno hasta alcanzar un estado de saturación, momento en el cual ya no pueden adsorber más del colorante. Este punto se identifica visualmente al observar la formación de un halo en la mezcla, indicando que las partículas están completamente recubiertas (Pino González, Esteras González, & Jiménez Sáez, 2018).

La verificación de esta metodología se realiza mediante la “prueba de la mancha”. Usando un gotero, se extrae una porción de la suspensión arcillosa y se deja caer una gota sobre el papel filtro especializado. Físicamente, el papel actúa como un medio cromatográfico que retiene las partículas sólidas teñidas en el centro, dando paso al agua para que salga. Si la arcilla aún tiene capacidad de adsorción, el anillo exterior de humedad será incoloro; por otro lado, cuando la arcilla pierda esta propiedad, el exceso de reactivo libre en el agua formará un halo color azul de aproximadamente un milímetro de espesor alrededor de la gota esparcida.

El final de este proceso se marca mediante la determinación matemática del Valor de Azul de metileno, un indicativo que traduce el volumen del reactivo consumido en un índice directo de la actividad mineralógica. La formulación matemática definida por las normas relaciona los miligramos de colorante fijados por unidad de masa de suelo seco, determinando la capacidad de intercambio de la muestra. Este parámetro numérico final es el que permite clasificar los suelos según su potencial de deformación; valores que superan los umbrales críticos de la norma, establecen que el material es altamente expansivo, alertando sobre la gran presencia de montmorillonita en el estrato.

$$VA = \frac{C * V}{W}$$

Donde:

VA = Valor de Azul de metileno en mg de azul por gramo de material seco que pasa el tamiz 75 µm (No 200),

C = Concentración de la solución de Azul de metileno, en mg de azul por ml de solución,

*Tabla 1. Valor de azul de metileno y el comportamiento esperado de la mezcla asfáltica.
Fuente: Norma INV E235-07*

Valor de azul de metileno (ml/gr)	Desempeño anticipado
< 6	Excelente
7 – 12	Marginalmente aceptable
13 – 19	Problemas / Posible falla
> 20	Fallado

V = ml de solución de Azul de metileno requerida en la titulación,

W = gramos de material seco utilizado en la prueba.

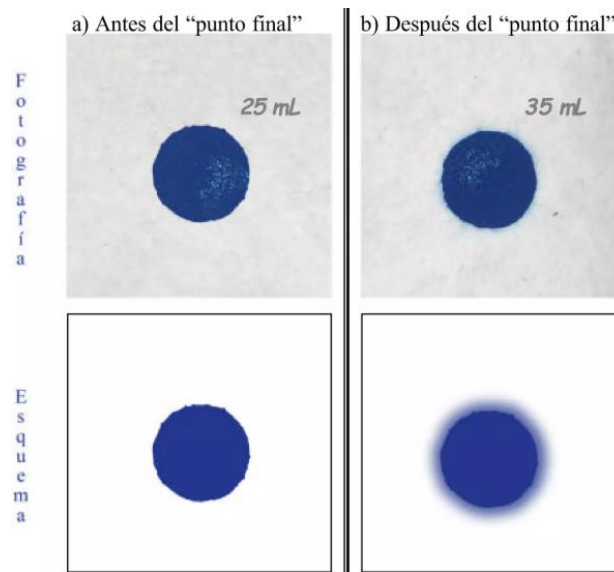


Ilustración 8. Prueba azul de metileno

Fuente: <https://es.slideshare.net/slideshow/azul-de-metilenopdf-2/15552211>

2.4. Instrumentación del sensor IoT.

Un sensor IoT (Internet de las cosas) es un dispositivo electrónico capaz de captar una variable física del entorno, como el desplazamiento, humedad, temperatura, y convertirla en una señal digital la cual puede ser transmitida de forma inalámbrica hacia una red, plataforma en la nube o un sistema de almacenamiento local.

Internet de las Cosas (IoT) en geotecnia se refiere a la integración de sensores físicos, unidades de procesamiento embebido y redes de comunicación para el monitoreo remoto y continuo de parámetros del suelo. Los componentes principales de un sistema IoT geotécnico incluyen: sensores de campo (desplazamiento, presión de poros, humedad), unidades de adquisición de datos (DAQ), protocolos de comunicación (WiFi, LoRa, MQTT) y plataformas de visualización web lo cual permite:

- ✚ Reducir el error humano en la lectura del deformímetro

- ✚ Obtener curvas completas de expansión vs. tiempo (no solo lecturas puntuales)
- ✚ Almacenar automáticamente los datos con marcas de tiempo
- ✚ Acceder al monitoreo en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a la red
- ✚ Comparar simultáneamente 6 muestras con diferente compactación

2.4.1. Raspberry pi 4 model b

Es una computadora de placa única (single-board computer), es decir, un ordenador completo que está construido sobre una placa de circuito impreso. La arquitectura de estos modelos destaca por incluir un sistema en chip (SoC) que unifica el procesamiento central, procesamiento gráfico y la memoria de acceso aleatorio. Desde la perspectiva de la instrumentación e ingeniería, su relevancia se fija más en los puertos de Entrada7salida de propósito general (GPIO). Los cuales permiten la interfaz directa con sensores y actuadores mediante protocolos de comunicación serial, actuando simultáneamente como servidores de bases de datos locales y pasarelas de conectividad a redes inalámbricas.

2.4.2. Convertidor acdc m5.

Son componentes electrónicos diseñados para transformar el voltaje sinusoidal variable proveniente de las redes de distribución eléctrica en una señal de tensión continua y constante conocidos como los módulos de conversión alterna a corriente continua (AC-DC). En sistemas de micro procesamiento embebido, estos convertidores cumplen una función crítica de estabilización y desacoplamiento eléctrico. Mediante etapas de filtrado y regulación lineal o conmuta, reducen el ruido electromagnético y las caídas de tensión remanentes de la línea principal, lo que garantiza que los circuitos

lógicos y los semiconductores operen bajo márgenes térmicos y eléctricos seguros, lo cual evita fallos en software por fluctuaciones energéticas.

2.4.3. Sensor de desplazamiento lineal

Sensores de desplazamiento lineal también conocidos como sensores de posición lineal, son componentes críticos en la automatización industrial moderna, los sistemas de medición de precisión y la ingeniería aeroespacial. Estos dispositivos convierten el movimiento mecánico lineal en señales eléctricas medibles, actuando como un puente fundamental entre el mundo físico y el digital. Con el rápido avance de la tecnología manufacturera y la creciente demanda de control de alta precisión, los sensores de desplazamiento lineal han evolucionado hacia una familia diversa de productos, cada uno adaptado a escenarios de aplicación específicos.

La función principal de todos los sensores de desplazamiento lineal es traducir los cambios de posición lineal en señales eléctricas, aunque los mecanismos subyacentes varían significativamente según el tipo. Los sensores potenciométricos funcionan según el principio de la división de resistencias. Un cursor móvil conectado al objeto medido se desliza a lo largo de un elemento resistivo, variando así la tensión de salida proporcionalmente al desplazamiento. Este diseño sencillo proporciona una señal de salida elevada, pero sufre desgaste mecánico con el tiempo. (Jiangxi SOP Precision Intelligent Manufacturing Technology Co., 2026)

2.4.4. Fuentes de 12v, 5v y 3amp.

Un sistema de fuentes de alimentación de 12V, 5V y 3amp es la arquitectura de potencia electrónica encargada de proveer energía de forma estable y segmentada de diferentes componentes de un sistema de adquisición de datos, la cual respeta las demandas individuales de voltaje e intensidad de corriente. La estabilidad operativa de un sistema de instrumentación enfocado en el monitoreo de suelos depende de una

arquitectura segmentada y calculada según las demandas de voltaje (V) y corriente (A) de cada componente.

En ensayos de caracterización de arcillas expansivas, esta distribución es fundamental: Los sensores de desplazamiento lineal (Como transductores LVDT o potenciómetros) requieren un voltaje de excitación elevado y continuo (12V) para energizar sus circuitos internos y mantener la linealidad de la señal analógica que cuantifica el hinchamiento milimétrico del suelo.

2.4.5. Función de TARE electrónica

La función TARE establece un punto de referencia del sistema antes de cada ensayo. Al ser activada, se registra la lectura bruta actual de cada sensor y la persiste de modo que si la raspberry Pi se reinicia durante el ensayo, los valores de calibración se recuperan automáticamente.

2.4.6. Dashboard web.

El dashboard web, es desarrollado por HTML5/CSS3/JavaScript con la librería Chart.js, la cual presenta en tiempo real:

-  Panel de calibración en un estado calibrado/sin calibrar por un punto de estudio con indicador visual.
-  Lectura bruta del sensor
-  Tarjetas de expansión que es el valor promedio con barra de progreso
-  Gráfico interactivo para ver las curvas de expansión para la muestra elegida
-  Cambio de unidades en tiempo real
-  Tabla resumen con expansión actual, máximo registrado y estado de calibración
-  Actualización automática configurable.

3. CAPÍTULO III – DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Obtención de muestras para caracterización

Para la investigación se obtuvieron las muestras en un tramo de la ruta del Spondylus que pasa por Manta, conocida en la ciudad como Vía Circunvalación, desde la ciudadela Sariland hasta la gasolinera CLYAN. Se tomaron muestras de los 3 puntos donde se observó mayor deformación de la vía, a continuación, se presentan las ubicaciones de los muestreos.

Tabla 2. Ubicaciones de las tomas de muestras.

Ruta del Spondylus (Vía Circunvalación)			
Muestra 1	Descripción	Talud cerca de la urbanización Sariland	
	Coordenadas UTM	17M	529978.00 m E
			9892463.00 m S
Muestra 2	Descripción	Talud a la salida de la Calle Carrillo hacia Vía Circunvalación	
	Coordenadas UTM	17M	530452.00 m E
			9892290.00 m S
Muestra 3	Descripción	Talud cerca de la gasolinera Clyan	
	Coordenadas UTM	17M	530623.00 m E
			9892249.00 m S

Para cumplir los objetivos de este estudio se realizaron estudios de clasificación de suelos como la granulometría por lavado, los límites líquidos, plásticos y de contracción, para confirmar la sospecha de que el suelo en cuestión sea una arcilla con propiedades altamente expansivas. También se realizaron los ensayos de Proctor modificado, expansividad siguiendo el método CBR y azul de metileno.



Ilustración 9. Ubicación satelital de la toma de muestras en la vía circunvalación



Ilustración 10. Extracción de muestras cerca de la ciudadela Sariland.

3.2. Contenido de humedad

Se siguió la metodología que indica la norma ecuatoriana NTE INEN 690 “Determinación del contenido de agua – Método del secado al horno” en la cual se establecen los pasos para llevar a cabo el ensayo.

Equipos y materiales

- Horno,
- Tamiz No. 3/4,

- Muestra de suelo recién extraída,
- Balanza,
- Taras, recipientes y otros utensilios generales.

Procedimiento

- Se pasó por el tamiz 3/4 una parte de la muestra recién extraída que supere por poco los 500 gr.
- Se obtuvo el peso de la tara vacía en la balanza para restarlo en los cálculos finales del ensayo.
- Se puso esta muestra tamizada en la tara y se tomó el peso en la balanza.
- Se repitieron los primeros tres pasos con otra tara y más muestra para obtener un segundo resultado y llegar a un promedio.
- Se colocaron las taras llenas de muestra en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.
- Después de sacar del horno las taras con las muestras de suelo secas, se determina su peso para proceder con los cálculos.



Ilustración 11. Proceso de tamizado y pesado de las muestras.

3.3. Granulometría por lavado

Se siguió la metodología que dicta la norma ecuatoriana NTE INEN 697

“Determinación del material más fino que pasa el tamiz con aberturas 75 μm (No. 200) mediante lavado”, en la cual se indican los pasos y los materiales necesarios para ejecutar el ensayo.

Equipos y materiales

- Balanza,
- Tamiz No. 200,
- Horno,
- Muestra de suelo seca de 100 gr,
- Taras, recipientes y otros utensilios generales.

Procedimiento

- Se colocó en el tamiz No. 200 una cantidad de 100 gramos de la muestra extraída en el punto.
- Se comenzó el proceso de lavado de la muestra con agua potable para que las partículas con un tamaño menor a 75 μm pasen del tamiz y este retenga únicamente las de mayor tamaño, el proceso de lavado terminó una vez que el agua que pasa por el tamiz fue transparente.
- Se secó el material lavado en el horno a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

- Se calculó la pérdida de masa resultante del tratamiento de lavado como un porcentaje de la muestra puesta en el tamiz No. 200 y se informó como el porcentaje de material más fino que 75 μm mediante lavado.



Ilustración 12. Lavado granulométrico de las muestras.

3.4. Límites de Atterberg

Mediante la alteración controlada del contenido de agua en la muestra del suelo que pasó por el tamiz No. 40, se definieron los porcentajes de humedad que delimitan el comportamiento fluido y plástico del estrato.

3.4.1. Límite líquido

Se siguió la metodología que indica la norma ASTM D4318 “Límite líquido, límite plástico, y el índice de plasticidad de los suelos”.

Equipos y materiales

- Dispositivo mecánico (Copa de Casagrande),
- Muestra de suelo seca (200 gr),
- Tamiz No. 40,
- Acanalador,

- Plato o fuente de mezclado,
- Espátula,
- Piseta,
- Horno,
- Balanza de precisión,
- Taras, recipientes y otros utensilios generales.

Procedimiento

- Se tomó una muestra de alrededor de 200 g del material que pase el tamiz 425 μm (No. 40).
- A esta muestra se la dejó evaporar, cuando fue necesario, o se le añadió agua y se mezcló completamente en la fuente, usando la espátula, hasta que se obtuvo una pasta de suelo homogénea y densa que pueda moldearse fácilmente con los dedos.
- Se colocó una porción de esta pasta en la copa, extendiéndola cuidadosamente con la espátula hasta que alcanzó un grosor de aproximadamente 10 mm, cuidando que no queden atrapadas burbujas de aire.
- Se hizo una separación en la muestra por la mitad con el acanalador, evitando que las capas creadas de muestra se desplacen por la copa.
- Se giró el manubrio del dispositivo de la Copa de Casagrande a una velocidad de 2 revoluciones por segundo, se contaron los golpes necesarios para que las dos mitades de la muestra se pongan en contacto al fondo del canal, en una distancia continua de alrededor de 10 mm, por la fluencia del suelo y no por deslizamiento entre el suelo y la copa.
- Se añadió muestra seca para disminuir la humedad de la muestra saturada o, según se necesitara, se aumentó el nivel de agua en el ensayo para obtener, al

menos 3 números de golpes que estén dentro de los rangos: 15 a 25, 20 a 30 y 25 a 35 golpes.

- Cuando se cumpla uno de los rangos, tomar una porción de aproximadamente 10 g y determinar el contenido de humedad al secarlo en el horno.
- Se hace un gráfico que cruce los datos de contenido de humedad con el número de golpes para crear una curva y determinar en qué porcentaje de contenido de humedad corta con los 25 golpes, el cual será el valor del límite líquido del ensayo.



Ilustración 13. Desarrollando ensayo en copa casa grande para la determinación del límite líquido.

3.4.2. Límite plástico

Se siguió la metodología que indica la norma ecuatoriana NTE INEN 692

“Determinación del límite plástico”

Equipos y materiales

- Muestra seca de suelo (200 gr),
- Tamiz No. 40,
- Plato o fuente de mezclado,
- Espátula,

- Placa de rolado,
- Horno,
- Piseta,
- Balanza de precisión,
- Tasas, recipientes y otros utensilios generales.

Procedimiento

- Se usó el material seco que pasó el tamiz No. 40 y se le añadió agua hasta que alcanzó una consistencia uniforme y plástica.
- Con la muestra en estado plástico, se extrajo una parte y se crearon rollitos de aproximadamente 3 mm en la placa de rolado con el objetivo de que presenten pequeñas fisuras en su superficie.
- Se colocaron las muestras en recipientes para determinar su porcentaje de humedad.
- El valor del límite plástico será el contenido de humedad que contenga la muestra extraída.



Ilustración 14. Desarrollando ensayo en copa casa grande para la determinación del límite plástico

3.4.3. Límite de contracción

Con guía en la norma INV E – 127 – 13 “Determinación de los factores de contracción de los suelos”, se realizaron los pasos para este ensayo.

Materiales

- Dispositivo mecánico (Copa de Casagrande),
- Muestra de suelo seca (200 gr),
- Tamiz No. 40,
- Acanalador,
- Plato o fuente de mezclado,
- Espátula,
- Piseta,
- Horno,
- Balanza de precisión,
- Cápsulas de contracción,
- Taras, recipientes y otros utensilios generales.

Procedimiento

- Se tomó una muestra de alrededor de 200 g del material que pase el tamiz 425 μm (No. 40).
- A esta muestra se la dejó evaporar, cuando fue necesario, o se le añadió agua y se mezcló completamente en la fuente, usando la espátula, hasta que se obtuvo una pasta de suelo homogénea y densa que pueda moldearse fácilmente con los dedos.

- Se colocó una porción de esta pasta en la copa, extendiéndola cuidadosamente con la espátula hasta que alcanzó un grosor de aproximadamente 10 mm, cuidando que no queden atrapadas burbujas de aire.
- Se hizo una separación en la muestra por la mitad con el acanalador, evitando que las capas creadas de muestra se desplacen por la copa.
- Se giró el manubrio del dispositivo de la Copa de Casagrande a una velocidad de 2 revoluciones por segundo, se contaron los golpes necesarios para que las dos mitades de la muestra se pongan en contacto al fondo del canal, en una distancia continua de alrededor de 10 mm, por la fluencia del suelo y no por deslizamiento entre el suelo y la copa.
- Se añadió muestra seca para disminuir la humedad de la muestra saturada o, según se necesitara, se aumentó el nivel de agua en el ensayo para obtener un rango de golpes entre 19 y 23.
- Cuando se cumplió el rango, se tomó esa masa con la espátula para depositarla en la cápsula de contracción asegurándose de llenarla lo más posible de muestra y enrasarlo para que quede al mismo nivel de la altura de la cápsula, cuidando de no dejar espacios con aire en la mezcla dentro de la cápsula.
- El límite de contracción será el contenido de humedad determinado luego de secar la muestra dentro de la cápsula en el horno.



Ilustración 15. Elaboración del ensayo de límite de contracción en las 3 muestras analizadas.

3.5. Ensayo de Proctor modificado.

El ensayo basado en la normativa ASTM D1557 para el Proctor modificado busca una energía de compactación aproximado a $2700 \frac{KN-m}{m^3}$ para simular las condiciones reales de carga que pueden existir en la vía donde se obtuvieron las muestras, para llegar a ello, se debe realizar un estudio de compactación utilizando los siguientes materiales en laboratorio.

Equipos y materiales

- Molde para ensayo Proctor
- Martillo de compactación
- Balanza,
- Horno de secado,
- Tamiz malla $\frac{3}{4}$ pulgadas,
- Tamiz malla $\frac{3}{8}$ pulgadas,
- Tamiz malla N°4,

- Regla metálica de enrasado,
- Vasos o recipientes
- Herramientas menores de mezclado,

Procedimiento.

- De cada una de las muestras extraídas, se segregó una fracción con un peso aproximado entre 6 a 8 kg. Posteriormente, se sometió el material a un proceso de secado en horno.
- Se realizó el análisis granulométrico empleando el juego de tamices (3/4", 3/8" y N°4) determinando que correspondía al método c de compactación, especificada en la normativa. Se descarto el material retenido en el tamiz 3/4", utilizando el pasante
- El material se humedeció en cada muestra con diferentes porcentajes de agua iniciales, 13% para las muestras 1 y 3, y 20% para la muestra 2 con rangos de 3% entre sí (a excepción de los dos últimos puntos de la muestra 1 con 5% y 2%), mezclando uniformemente el agua con el suelo.
- Se preparó el molde con su base sin el collarín de extensión y se registró su peso, luego se colocó el collarín de extensión. Se dividió la muestra en 5 partes iguales para empezar con el proceso de compactación, aplicando 56 golpes por cada capa.
- Al terminar la última capa, se retiró el collarín de extensión, se enrasó con la regla metálica cortando así el excedente del suelo en el molde hasta que quede nivelada.
- Se procedió a pesar en la balanza (molde + suelo húmedo compactado), registrando el peso obtenido.

- Se extrajeron muestras representativas de la parte superior e inferior del suelo, se registró su peso húmedo y se introdujo al horno durante 24 horas.
- El proceso se repitió hasta que el peso total del molde más el suelo sea menor al peso del espécimen anterior, comprobando el descenso consecutivo de la masa húmeda.
- Después de las 24 horas de secado de las muestras representativas del suelo húmedo en cada ensayo, se procedió a pesar en su estado seco.
- Se calcularon las humedades óptimas de cada muestra a partir de su densidad y contenido de humedad.



Ilustración 16. Elaboración del ensayo Proctor, para la obtención de la humedad óptimas en cada una de las muestras.

3.6. Ensayo de expansión siguiendo el método CBR

El ensayo de expansión mediante el monitoreo del CBR (California Bearing Ratio) se realiza para determinar cuánto es la expansión de un suelo antes de efectuar el ensayo de penetración CBR, permitiendo evaluar si el suelo, en este caso la arcilla ensayada tiene características expansivas. Empleando la metodología en la norma NTE INEN 857, se emplea únicamente hasta la fase de saturación e inmersión.

Equipos y materiales.

- Tamiz $\frac{3}{4}$
- Molde CBR,
- Disco espaciador,
- Papel filtro,
- Placa perforada con vástago ajustable,
- Pesas de sobrecarga anulares
- Trípode metálico,
- Dial de deformación o extensómetro,
- Tanque de inmersión,
- Martillo de compactación,
- Balanza
- Horno de secado
- Regla o calibrador
- Muestra de suelo representativa (6 kg por molde)
- Agua potable
- Grasa o vaselina

Procedimiento.

- Se prepararon tres muestras de suelo seca, cada una de 6 kilogramos, las cuales fueron previamente tamizadas por el tamiz $\frac{3}{4}$.
- Se acondicionaron con el contenido de humedad óptimo requerido para el ensayo obtenido de los Proctor.
- Cada muestra se colocó en un molde CBR; medido, pesado y preparado anteriormente de tal manera que quede engrasado y con el disco espaciador en su interior, además de colocar encima el papel filtro. A continuación, se

compactaron 5 capas empleando diferentes energías de compactación: 12 golpes por capa; 25 golpes por capa y 56 golpes por capa.

- Una vez finalizada la compactación, se enrasó la superficie de cada muestra, se quitó el disco separador junto con el papel filtro, se giró el molde y se pesó, una vez realizado esto se colocó la placa perforada junto con las sobrecargas correspondientes.
- Se calibró con el trípode y el dial sobre cada molde para medir las variaciones de altura ocasionadas por la expansión del suelo.
- Los moldes se sumergieron completamente en los tanques de agua durante un periodo de más de 96 horas para saturar las muestras.
- Durante el periodo de inmersión se registraron las lecturas el primer día de inmersión a la primera, tercera y quinta hora después de la inmersión.
- A raíz de las primeras lecturas, las siguientes fueron diariamente pasada las 24 horas de la inmersión hasta cumplir, primero, con los 4 días por normativa y después se dejó la muestra 3 días más hasta completar la semana entera para evaluar algún cambio significativo en la expansión del material.
- Se analizaron las 3 muestras en cuanto expansión mediante las lecturas diarias, y se escogió la que presentaba mayor expansividad para el análisis comparativo con el sensor IoT.



Ilustración 17. Elaboración del ensayo de expansión siguiendo el método CBR

3.7. Ensayo de Azul de metileno.

El ensayo de azul se realizó siguiendo los pasos que se indican en la norma ASTM C837 “Método de ensayo estándar para el índice de azul de metileno en arcillas”.

Equipo y materiales

- 1 gr de azul de metileno en polvo para análisis,
- 1 gr de muestra seca de suelo que pase el tamiz No. 200
- 130 ml de agua destilada,
- Gotero,
- Jeringa de 1ml,
- Papel filtro Whatman No. 20,
- Vasos de precipitados de capacidad máxima de 50, 100 y 200 ml.
- Balanza de precisión,
- Taras, recipientes y otros utensilios generales.

Procedimiento

- Se puso la muestra en el tamiz No. 200 con el objetivo de que pase 1 gr de esta para iniciar con el procedimiento.
- Se vertió en el vaso de precipitado 30 ml de agua destilada y se le añadió el gramo de muestra seca obtenida en el paso anterior, se mezcló hasta obtener una solución lechosa.
- Se vertió en vaso de precipitado 100 ml de agua destilada y se diluyó 1 gr de azul de metileno en polvo para análisis con el objetivo de crear la solución necesaria para el ensayo.
- Se tomaron 0.5 ml de la solución de azul de metileno y se introdujo en el agua destilada con la muestra de suelo para mezclarlo durante un minuto.
- Pasado el minuto de mezcla se toma una porción de la solución con el gotero y se deja caer una gota en el papel filtro. El objetivo del ensayo radica en observar un halo que rodee toda la gota que se dejó caer en el papel filtro.
- Se repiten los pasos 4 y 5 hasta que se obtenga un halo de color azul claro alrededor de toda la gota.
- Una vez que se obtenga la primera gota con halo se esperan 5 minutos a que se seque el papel, si el halo no desaparece, se deja caer otra gota de la misma mezcla (sin agregarle los 0.5 ml de solución de azul), este paso se repite dos veces, si el halo no desaparece en las 3 gotas, se da el ensayo por terminado.

- Se realizan los cálculos con la fórmula de valor de azul de metileno basado en la cantidad de veces que se tuvo que agregar la solución de azul de metileno a la mezcla con la muestra de suelo.



Ilustración 18. Elaboración del ensayo azul de metileno.

3.8.Procedimiento para la aplicación de la Instrumentación del sensor IoT.

El desarrollo de un sistema IoT para el monitoreo continuo de la expansión de suelos arcillosos responde a la necesidad de contar con datos de alta frecuencia y resolución que los métodos convencionales no pueden proporcionar en algunas ocasiones. La integración de sensores eléctricos de posición lineal con una plataforma de adquisición digital y visualización web.

Equipo y materiales principales

- Raspberry pi 4 model b
- Cables
- Convertidor acdc m5
- Sensor de desplazamiento
- Ventilador

- Pantalla con sistema Linux
- Mouse
- Teclado
- Disipador de calor
- Aplicación web (Dashboard web).

Procedimiento.

- Se compactó el suelo de la muestra 1 en los moldes CBR con la energía correspondiente para los 56 golpes por capa en 5 capas totales.
- Se colocaron las pesas de sobrecarga y el collar superior sobre la muestra a evaluar.
- Una vez montado el molde completo, se ubicó el trípode junto al sensor de posición lineal sobre el vástago del molde, verificando que el sensor esté en contacto con la muestra.
- Se Verificó que las lecturas brutas mostradas en el dashboard presentaran un offset, (ejemplo: P1A:1.24 mm, P1B: 0.81 mm) lo cual es normal y se elimina mediante la función TARE.
- Se Presionó el botón físico de TARE, o bien se hizo clic en “TARE GLOBAL” en el dashboard. El LED parpadeó 5 veces y quedó encendido, mientras que el dashboard mostro 0.000 mm de la muestra analizada.
- Se sumergieron los moldes en el tanque de agua, empezando con el ensayo de 96 horas. El sistema registró una lectura cada hora de manera automática y constante los cuales se reflejaban en el dashboard y se podían monitorear remotamente desde un dispositivo con navegador a través de la página:
<https://www.raspberrypi.com/software/connect/>.

- Una vez pasadas las 96 horas, el dispositivo está programado para detener la lectura y se puede dar por finalizado el ensayo.

El dashboard guarda automáticamente las lecturas obtenidas por hora y realiza una gráfica de desplazamiento por tiempo.

4. CACPÍTULO IV – CÁLCULOS Y RESULTADOS

4.1. Resultados de Ensayo de contenido de humedad

Tabla 3. Resultados del contenido de humedad natural de las muestras.

No. de muestra	M. húmeda	M. seca	Humedad	Promedio
Muestra 1	524.6 g	426.0 g	23.15%	21.42%
	512.5 g	428.2 g	19.69%	
Muestra 2	507.4 g	450.9 g	12.53%	10.86%
	503.6 g	461.2 g	9.19%	
Muestra 3	510.8 g	385.7 g	32.43%	30.84%
	511.2 g	395.5 g	29.25%	

4.2. Resultados de Ensayo de granulometría por lavado

Tabla 4. Resultados de ensayo de granulometría por lavado de las muestras.

Nº. de muestra	Peso muestra inicial (gr)	% Retenido	% finos que pasa tamiz Nº 200	Clasificación preliminar AASHTO
Muestra 1	100	9.4	90.6	A7
Muestra 2	100	17.5	82.5	A7
Muestra 3	100	7.4	92.6	A7

4.3. Resultados de Ensayo para determinar los límites de Atterberg

4.3.1. Límites de Atterberg de la muestra 1

Tabla 5. Resultados de límites de Atterberg de la muestra 1.

Descripción	Límite líquido			Límite plástico
Nº de ensayo	1	2	3	4
Nº de vaso	M1-10	M1-20	M1-28	PHK1
Peso de vaso	7.04	8.29	6.17	6.81

Peso de cápsula + M.humeda (gr)	25.09	27.66	24.78	8.38
Peso de cápsula +M. seca(gr)	16.09	18.68	16.5	8.01
Peso del agua (gr)	9	8.98	8.28	0.37
Peso de la muestra seca(gr)	9.05	10.39	10.33	1.2
Contenido de humedad (%)	99.4	86.4	80.2	30.8
Nº de golpes	15	20	28	

Gráfica.

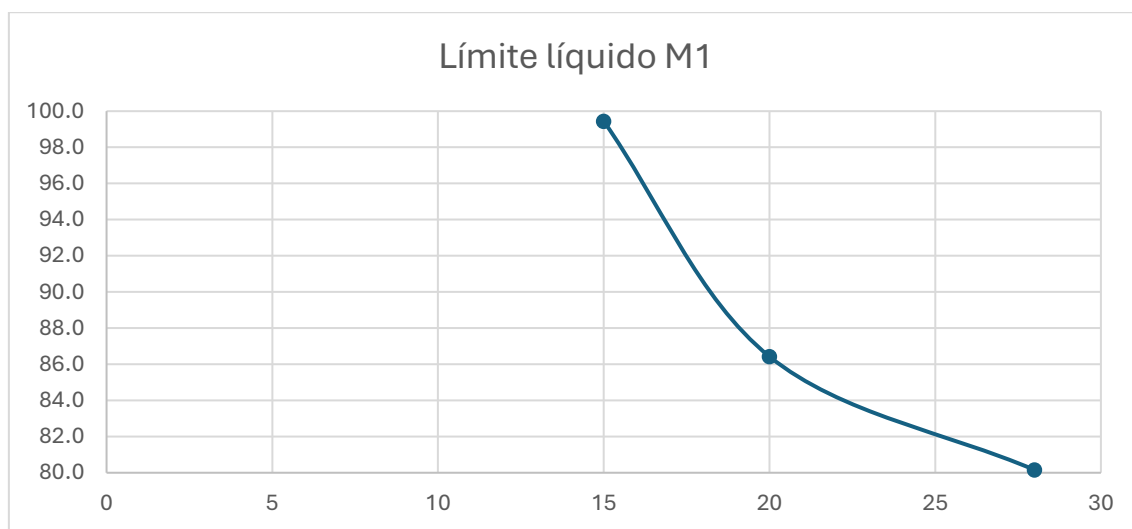


Ilustración 19. Gráfica límite líquido muestra 1.

Tabla 6. Resultados del índice de plasticidad de la muestra 1.

Límite líquido (corta en 25 golpes)	82.3
IP = LL-LP	51.5

4.3.2. Límites de Atterberg de la muestra 2

Tabla 7. Resultados de límites de Atterberg de la muestra 2

Descripción	Límite líquido			Límite plástico
N° de ensayo	1	2	3	4
N° de vaso	HK3	HK4	HK2	PHK2
Peso de vaso	8.38	10.79	6.5	6.18
Peso de cápsula + M.humeda (gr)	17.7	28.82	18.24	7.2
Peso de cápsula +M. seca(gr)	13.47	20.91	13.22	6.91
Peso del agua (gr)	4.23	7.91	5.02	0.29
Peso de la muestra seca(gr)	5.09	10.12	6.72	0.73
Contenido de humedad (%)	83.1	78.2	74.7	39.7
N° de golpes	19	28	35	

Gráfica

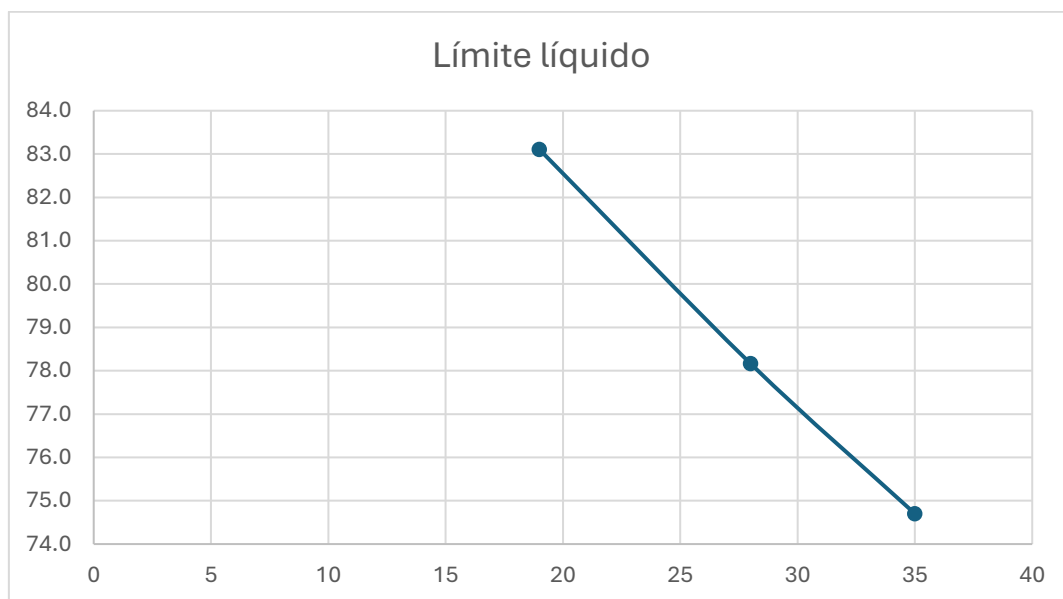


Ilustración 20. Gráfica límite líquido muestra 1.

Tabla 8. Resultados de índice de plasticidad de la muestra 2.

Límite líquido (corta en 25 golpes)	79.7
IP = LL-LP	40.0

4.3.3. Límites de Atterberg de la muestra 3

Tabla 9. Resultados de límites de Atterberg de la muestra 3.

Descripción	Límite líquido			Límite plástico
N° de ensayo	1	2	3	4
N° de vaso	13X	64	34X	B2
Peso de vaso	7.4	8.26	7.47	6.7
Peso de cápsula +M. húmeda (gr)	21.04	23.06	22.59	11.32
Peso de cápsula +M. seca(gr)	15.84	17.55	17.05	10.24
Peso del agua (gr)	5.2	5.51	5.54	1.08
Peso de la muestra seca(gr)	8.44	9.29	9.58	3.54
Contenido de humedad (%)	61.6	59.3	57.8	30.5
N° de golpes	17	27	32	

Gráfica

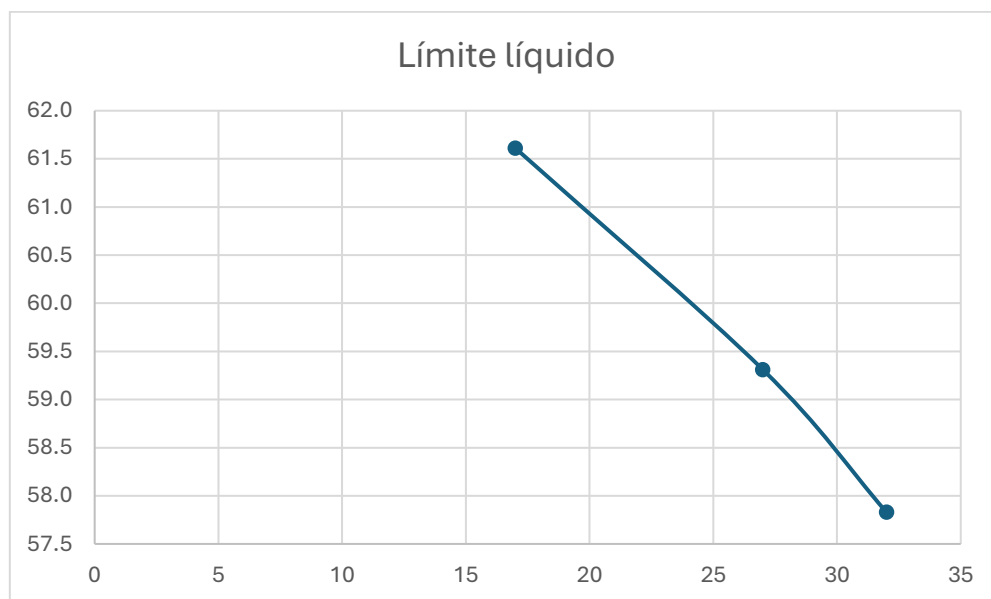


Ilustración 21. Gráfica límite líquido muestra 1

Tabla 10. Resultados de índice de plasticidad de la muestra 3.

Límite líquido (corta en 25 golpes)	59.8
IP = LL-LP	29.3

4.3.4. Clasificación de suelos según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

Tabla 11. Resultados de la caracterización de las muestras en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Muestra	% pasa N°200	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Posición vs Línea A	Grupo SUCS	Definición tabla SUCS
Muestra 1	90.6	82.3	30.8	51.5	Por encima	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad
Muestra 2	82.5	79.7	39.7	40.0	Por debajo	MH-CH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad y arcillas orgánicas.
Muestra 3	92.6	59.8	30.5	29.3	Muy cerca de la línea A	CH-MH	Arcilla / Limo de alta plasticidad

Gráfica.

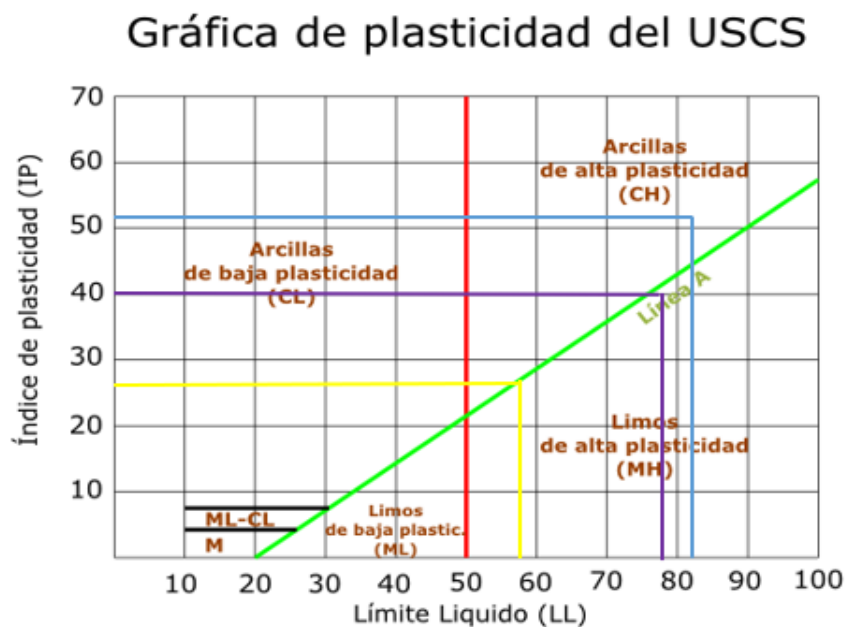


Ilustración 22. Gráfica de plasticidad por la normativa SUCS de la muestra 1,2 y 3.

4.3.5. Clasificación de suelos según el sistema de clasificación de suelos AASHTO.

Tabla 12. Resultados de la caracterización de las muestras en el Sistema AASHTO.

Muestra	LL (%)	IP (%)	LL-30	Criterio IP-30	Subgrupo AASTHO
1	82.3	51.5	52.3	IP<LL30	A-7-5
2	79.7	40	49.7	IP<LL30	A-7-5
3	59.8	29.3	29.8	IP<LL30	A-7-5

4.4. Resultados del ensayo de límite de contracción

Tabla 13. Resultados del ensayo del límite de contracción.

Muestra	V. Inicial (cm³)	V. Final (cm³)	Contenido de humedad (%)	Límite de contracción (%)
Muestra 1	10.18	5.25	63.87	10.24
Muestra 2	10.18	5.57	71.61	11.62
Muestra 3	10.18	6.91	43.25	14.25

4.5.Resultados ensayo Proctor modificado.

4.5.1. Proctor muestra 1

Molde-Muestra 1					
Volumen	2041.5 cm ³	Peso molde	6067.7 (g)	TOMA DE MUESTRA	SUPERIOR
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Peso muestra humeda+tara (g)	Peso muestra seca+tara (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm ³)
13%	9562.8	33.2	31	9.735	1.560
16%	9701.8	32.4	30.2	10.000	1.618
19%	9824.2	27.6	25.4	12.222	1.640
22%	9958.1	39.6	35.4	14.690	1.662
25%	10150.2	33.4	29.6	17.647	1.692
27%	10219.6	29.8	25.9	19.920	1.693
29%	10390.2	39.9	33.8	20.210	1.735
32%	10424.6	41.5	34.2	25.615	1.683
37%	10380.5	36.8	30.8	26.790	1.666
39%	10325.4	48	39.7	27.760	1.632

Ilustración 23. Tabla de datos muestra 1 de la toma de suelo superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad

Molde-Muestra 1					
Volumen	2041.5 cm ³	Peso molde	6067.7 (g)	TOMA DE MUESTRA	INFERIOR
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Peso muestra humeda+tara (g)	Peso muestra seca+tara (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm ³)
13%	9562.8	30.4	28.4	9.524	1.563
16%	9701.8	36.6	33.4	12.800	1.578
19%	9824.2	37	33.6	13.080	1.627
22%	9958.1	36	32.1	15.415	1.651
25%	10150.2	35.1	30.1	19.266	1.673
27%	10219.6	34.6	30.0	21.153	1.675
29%	10390.2	40.1	33.1	26.941	1.676
32%	10424.6	42	34.0	29.630	1.646
37%	10380.5	39.6	32.0	31.513	1.606
39%	10325.4	35.9	28.7	32.719	1.571

Ilustración 24. Tabla de datos muestra 1 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad

Molde-Muestra 1			
Volumen	2041.5 cm^3	PROMEDIO MUESTRAS INFERIOR Y SUPERIOR	
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm ³)
13%	9562.8	9.629	1.562
16%	9701.8	11.400	1.598
19%	9824.2	12.650	1.633
22%	9958.1	15.050	1.656
25%	10150.2	18.595	1.683
27%	10219.6	20.680	1.692
29%	10390.2	24.767	1.705
32%	10424.6	28.234	1.664
37%	10380.5	29.149	1.636
39%	10325.4	30.239	1.602

Ilustración 25. Tabla de datos muestra 1 del promedio de muestra inferior y superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.

Gráfica curva de compactación muestra 1.

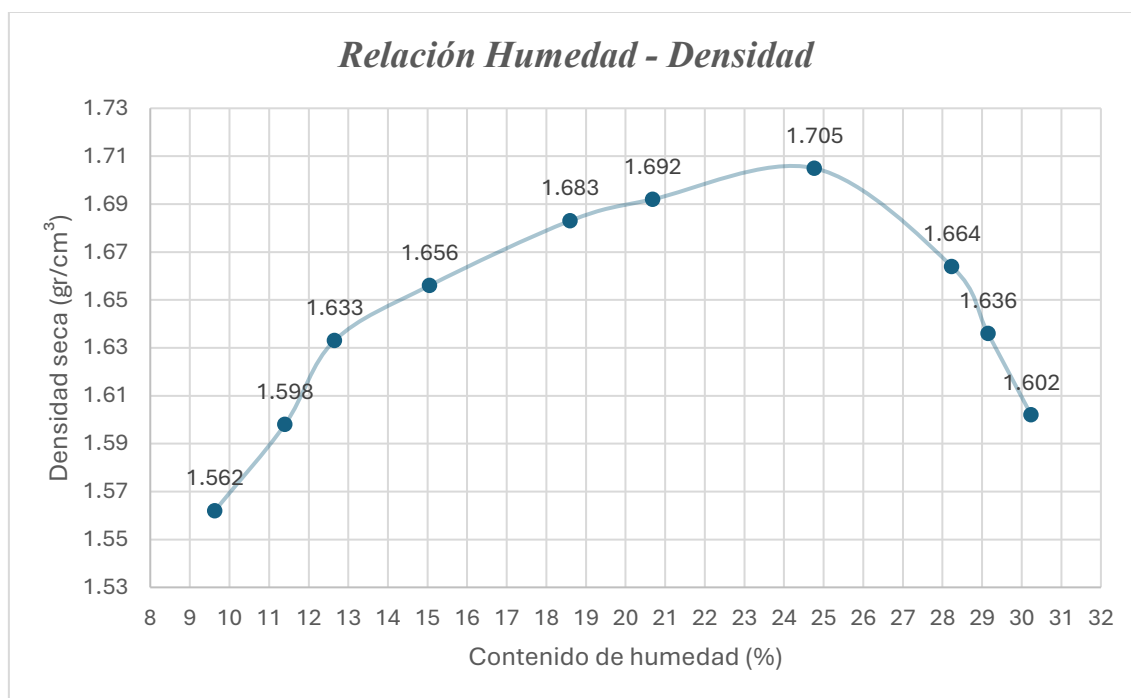


Ilustración 26. Gráfica de la curva de compactación muestra 1.

4.5.2. Proctor muestra 2

Molde-Muestra 2					
Volumen	2041.5 cm ³	Peso molde	6067.7 (g)	TOMA DE MUESTRA	SUPERIOR
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Peso muestra humeda+tara (g)	Peso muestra seca+tara (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm3)
20%	9183.6	24.6	20.3	30.935	1.166
23%	9381.2	24.4	20.2	35.000	1.202
26%	9492.7	27.2	21.6	36.842	1.226
29%	9617.4	23.2	18.7	38.462	1.256
32%	9685.1	29.8	23.2	40.244	1.263
35%	9656.4	37	28.2	47.312	1.193
38%	9651.8	36.9	26.9	49.751	1.172

Ilustración 27. Tabla de datos muestra 2 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.

Molde-Muestra 2					
Volumen	2041.5 cm ³	Peso molde	6067.7 (g)	TOMA DE MUESTRA	INFERIOR
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Peso muestra humeda+tara (g)	Peso muestra seca+tara (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm3)
20%	9183.6	34.2	28.3	28.780	1.185
23%	9381.2	23.2	19.5	36.260	1.191
26%	9492.7	35.2	28.2	36.630	1.228
29%	9617.4	27	21.6	35.440	1.284
32%	9685.1	31.6	24.6	43.210	1.237
35%	9656.4	42.6	31.7	46.380	1.201
38%	9651.8	34.6	26	45.450	1.179

Ilustración 28. Tabla de datos muestra 2 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad

+ -

Molde-Muestra 2			
Volumen	2041.5 cm ³	PROMEDIO MUESTRAS INFERIOR Y SUPERIOR	
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm ³)
20%	9183.6	29.858	1.175
23%	9381.2	33.872	1.212
26%	9492.7	35.088	1.242
29%	9617.4	36.319	1.276
32%	9685.1	41.727	1.250
35%	9656.4	46.847	1.197
38%	9651.8	49.307	1.176

Ilustración 29. Tabla de datos muestra 2 del promedio de muestra inferior y superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.

Gráfica curva de compactación muestra 2.

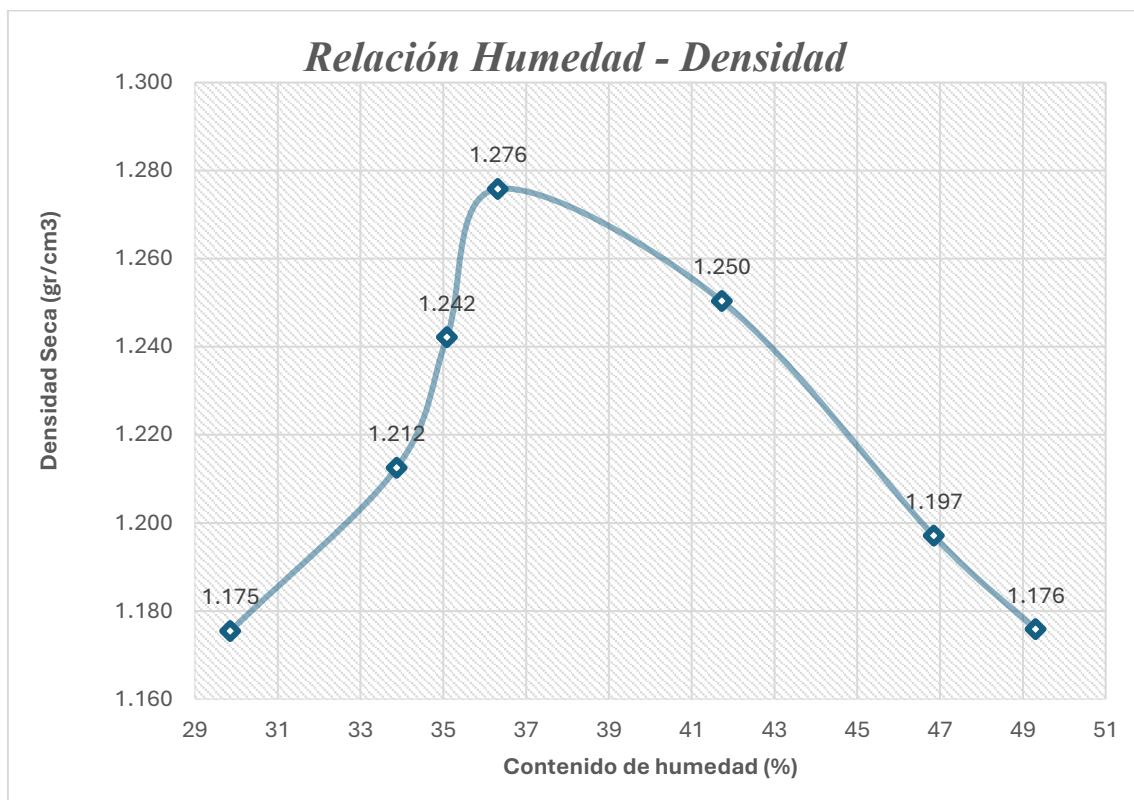


Ilustración 30. Gráfica de la curva de compactación muestra 2.

4.5.3. Proctor muestra 3

Molde-Muestra 3					
Volumen	2041.5 cm ³	Peso molde	6067.7 (g)	TOMA DE MUESTRA	SUPERIOR
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Peso muestra humeda+tara (g)	Peso muestra seca+tara (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm3)
13%	9421.4	64.8	59	11.240	1.477
16%	9543.4	67.9	60.2	14.92	1.481
19%	9599.2	43.2	38.4	15.094	1.503
22%	9650.4	52.6	45.8	17.708	1.491
25%	9597.4	40.6	35.2	21.910	1.458

Ilustración 31. Tabla de datos muestra 3 de la toma de suelo superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad

Molde-Muestra 3					
Volumen	2041.5 cm ³	Peso molde	6067.7 (g)	TOMA DE MUESTRA	INFERIOR
Humedad agregada	Peso suelo + molde (g)	Peso muestra humeda+tara (g)	Peso muestra seca+tara (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm3)
13%	9421.4	68.5	59.3	18.004	1.392
16%	9543.4	56.2	48.1	19.90	1.409
19%	9599.2	49.9	41.9	22.792	1.420
22%	9650.4	54.2	45.6	23.370	1.423
25%	9597.4	43.6	36.6	23.649	1.398

Ilustración 32. Tabla de datos muestra 3 de la toma de suelo inferior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad

Molde-Muestra 3			
Volumen	2041.5	PROMEDIO MUESTRAS INFERIOR Y SUPERIOR	
Humedad agregada	Peso suelo + molde ^{cm³} (g)	Contenido de humedad %	Densidad (g/cm3)
13%	9421.4	14.622	1.434
16%	9543.4	17.56	1.45
19%	9599.2	18.943	1.456
22%	9650.4	20.539	1.457
25%	9597.4	22.779	1.428

Ilustración 33. Tabla de datos muestra 3 del promedio de muestra inferior y superior del molde para la obtención del contenido de humedad y densidad.

✚ Gráfica curva de compactación muestra 3

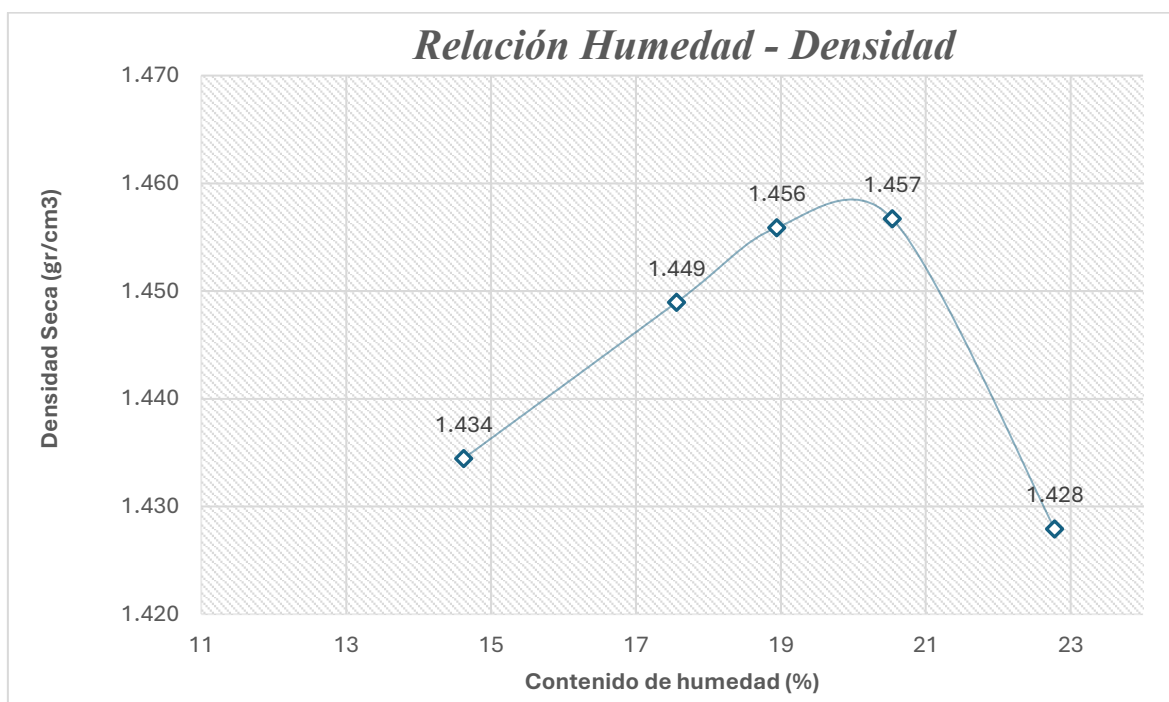


Ilustración 34. Gráfica curva de compactación muestra 3.

4.6. Resultados del ensayo de azul de metileno.

Tabla 14. Resultados del ensayo de azul de metileno.

Muestra 1	
Concentración de la solución (mg/ml)	10
Peso del suelo seco (gr)	1
Volumen de titulación (ml)	8
Valor de azul de metileno (mg/gr)	80
Muestra 2	
Concentración de la solución (mg/ml)	10
Peso del suelo seco (gr)	1
Volumen de titulación (ml)	13.5
Valor de azul de metileno (mg/gr)	135
Muestra 3	
Concentración de la solución (mg/ml)	10

Peso del suelo seco(gr)	1
Volumen de titulación(ml)	5
Valor de azul de metileno(mg/gr)	50

4.7. Resultados del ensayo de expansión siguiendo el método de CBR

4.7.1. Monitoreo con Dial.

Tabla 15. Lecturas registradas con el dial en pulgadas durante el proceso de expansión de las muestras.

EXPANSIÓN		Horas después de sumersión							
pulg	Golpes	1	3	5	24	48	72	96	168
Muestra1	12	0.149	0.222	0.261	0.38	0.411	0.422	0.422	0.426
	25	0.058	0.101	0.124	0.273	0.399	0.44	0.46	0.496
	56	0.049	0.084	0.101	0.306	0.447	0.512	0.558	0.588
Muestra2	12	0.079	0.12	0.14	0.172	0.188	0.195	0.203	0.216
	25	0.031	0.065	0.087	0.177	0.203	0.216	0.227	0.242
	56	0.011	0.038	0.054	0.17	0.199	0.233	0.253	0.298
Muestra3	12	0.17	0.256	0.311	0.414	0.427	0.438	0.431	0.435
	25	0.083	0.139	0.17	0.316	0.391	0.412	0.418	0.427
	56	0.084	0.143	0.177	0.33	0.404	0.435	0.45	0.469

Tabla 16. Lecturas registradas con el dial en milímetros durante el proceso de expansión de las muestras.

EXPANSIÓN		Horas después de sumersión							
mm	Golpes	1	3	5	24	48	72	96	168
Muestra1	12	3.785	5.639	6.629	9.652	10.439	10.719	10.719	10.820
	25	1.473	2.565	3.150	6.934	10.135	11.176	11.684	12.598
	56	1.245	2.134	2.565	7.772	11.354	13.005	14.173	14.935
Muestra2	12	2.007	3.048	3.556	4.369	4.775	4.953	5.156	5.486
	25	0.787	1.651	2.210	4.496	5.156	5.486	5.766	6.147

	56	0.279	0.965	1.372	4.318	5.055	5.918	6.426	7.569
Muestra3	12	4.318	6.502	7.899	10.516	10.846	11.125	10.947	11.049
	25	2.108	3.531	4.318	8.026	9.931	10.465	10.617	10.846
	56	2.134	3.632	4.496	8.382	10.262	11.049	11.430	11.913

 Gráfica curva expansión muestra 1

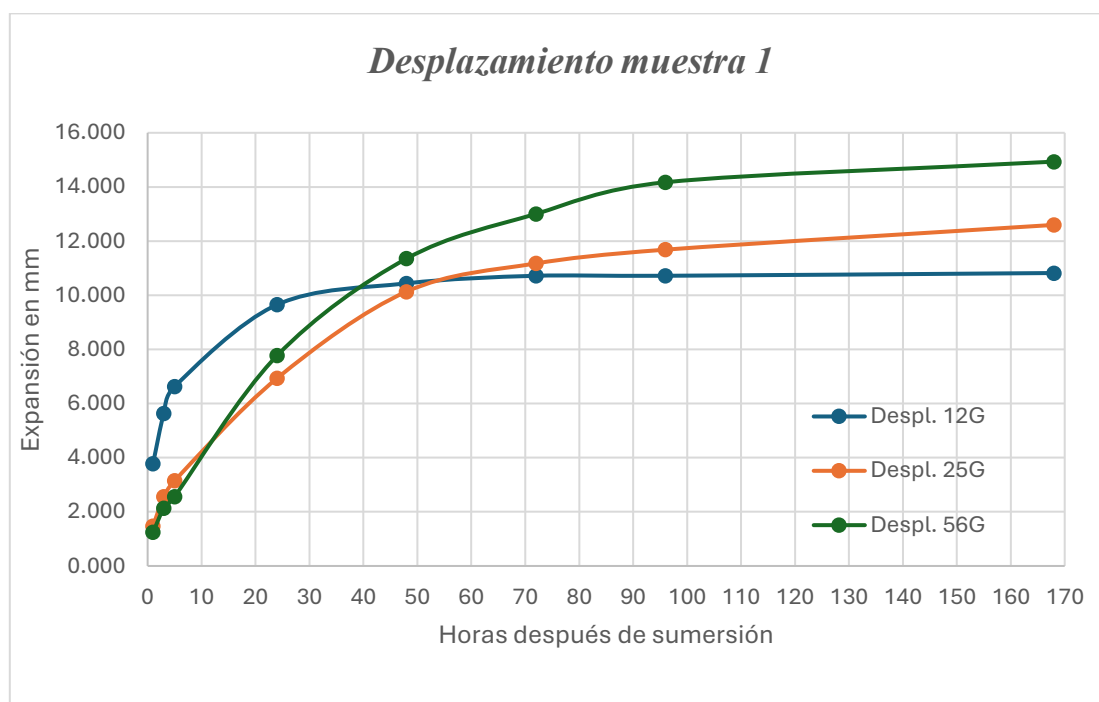


Ilustración 35. Gráfica de desplazamiento-expansión muestra 1

Gráfica curva expansión muestra 2

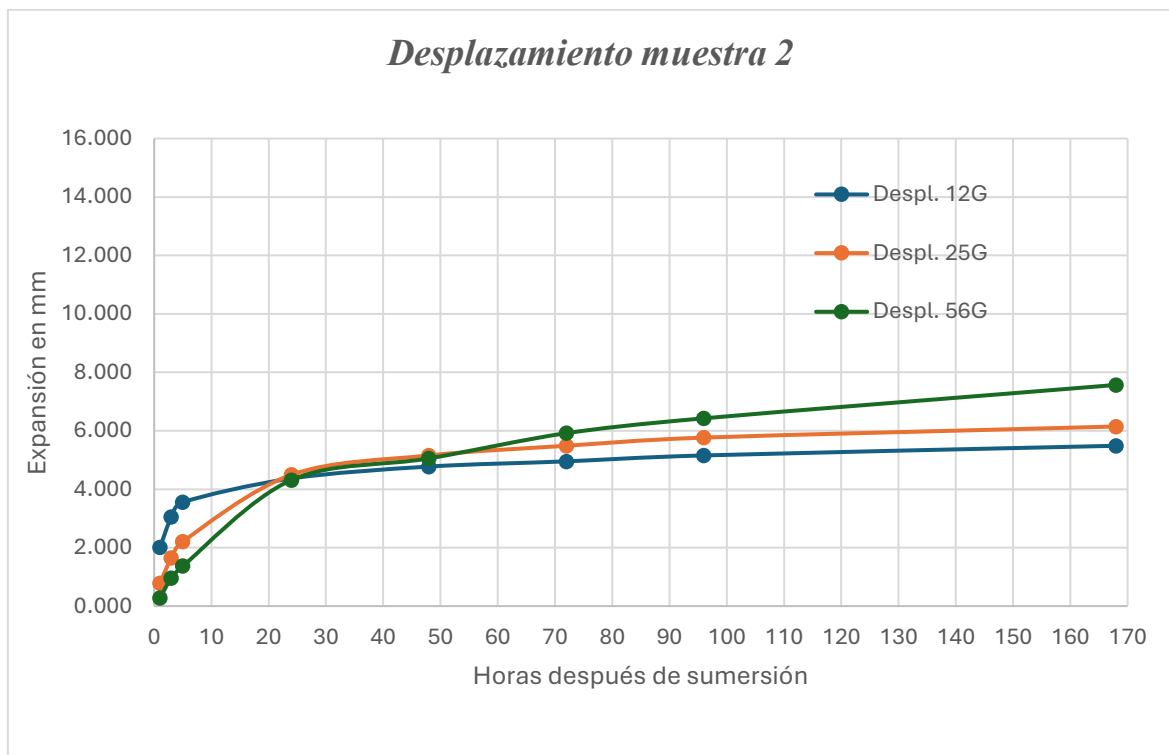


Ilustración 36. Gráfica de desplazamiento-expansión muestra 2.

Gráfica curva expansión muestra 3

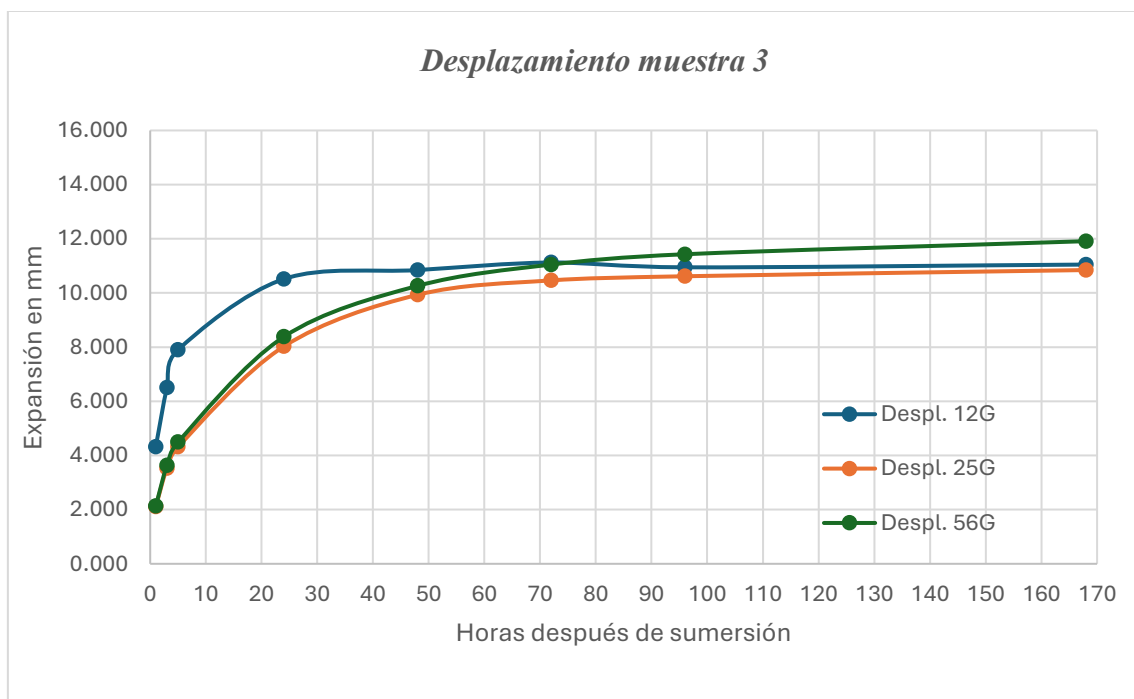


Ilustración 37. Gráfica de desplazamiento-expansión muestra 3.

4.7.2. Porcentaje de hinchamiento

Tabla 17. Resultados del porcentaje de hinchamiento de las muestras.

Porcentaje de hinchamiento				
Muestra	Golpes	ΔH (mm)	H (mm)	PH
Muestra 1	12	10.719	114	9.402
	25	11.684	114	10.25
	56	14.173	114	12.43
Muestra 2	12	5.156	114	4.523
	25	5.766	114	5.058
	56	6.426	114	5.637
Muestra 3	12	10.947	114	9.603
	25	10.617	114	9.313
	56	11.430	114	10.03

4.8. Resultados y comparación de la expansión del suelo (muestra 1), medidos de forma simultánea con dial y sensor IoT.

Medido con el dial.

Tabla 18. Resultados del desplazamiento de la muestra 1 medida con el dial.

Ensayo de expansión siguiendo el método CBR de la muestra 1 medido con dial		
Horas	Desplazamiento (pulg)	Desplazamiento (mm)
1	0.052	1.321
3	0.101	2.565
5	0.138	3.505
24	0.376	9.550
48	0.503	12.776
72	0.599	15.2146
96	0.658	16.7132

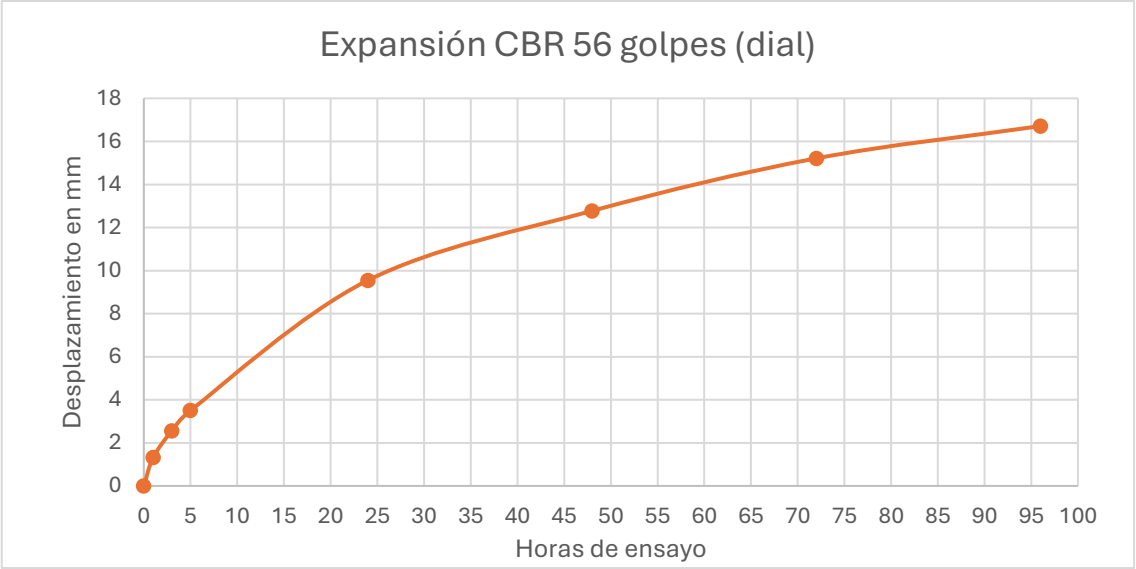


Ilustración 38. Gráfica de datos del desplazamiento de la muestra 1 medida con el dial.



Medido con el sensor IoT.

Registro completo de lecturas horarias (0-96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
0	0.000	0.00%
1	1.145	0.95%
2	1.720	1.43%
3	2.185	1.82%
4	2.580	2.15%
5	2.925	2.44%
6	3.235	2.70%
7	3.520	2.93%
8	3.785	3.15%
9	4.035	3.36%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0-96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
10	4.270	3.56%
11	4.495	3.75%
12	4.710	3.92%
13	4.930	4.11%
14	5.145	4.29%
15	5.350	4.46%
16	5.562	4.63%
17	5.769	4.81%
18	5.971	4.98%
19	6.168	5.14%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0–96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
20	6.364	5.30%
21	6.578	5.48%
22	6.789	5.66%
23	6.998	5.83%
24	7.249	6.04%
25	7.391	6.16%
26	7.575	6.31%
27	7.745	6.45%
28	7.910	6.59%
29	8.072	6.73%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0–96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
40	9.652	8.04%
41	9.779	8.15%
42	9.956	8.30%
43	10.131	8.44%
44	10.262	8.55%
45	10.424	8.69%
46	10.700	8.92%
47	10.793	8.99%
48	10.851	9.04%
49	11.025	9.19%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0–96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
50	11.092	9.24%
51	11.225	9.35%
52	11.363	9.47%
53	11.489	9.57%
54	11.615	9.68%
55	11.744	9.79%
56	11.866	9.89%
57	11.993	9.99%
58	12.102	10.09%
59	12.219	10.18%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0-96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
60	12.339	10.28%
61	12.448	10.37%
62	12.547	10.46%
63	12.655	10.55%
64	12.762	10.63%
65	12.861	10.72%
66	12.966	10.81%
67	13.066	10.89%
68	13.162	10.97%
69	13.219	11.02%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0-96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
70	13.317	11.10%
71	13.417	11.18%
72	13.491	11.24%
73	13.586	11.32%
74	13.667	11.39%
75	13.750	11.46%
76	13.827	11.52%
77	13.896	11.58%
78	13.977	11.65%
79	14.044	11.70%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0-96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
80	14.114	11.76%
81	14.190	11.82%
82	14.257	11.88%
83	14.319	11.93%
84	14.386	11.99%
85	14.448	12.04%
86	14.505	12.09%
87	14.568	12.14%
88	14.631	12.19%
89	14.689	12.24%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Registro completo de lecturas horarias (0–96 h)

Tiempo (h)	Expansión (mm)	% Expansión
87	14.568	12.14%
88	14.631	12.19%
89	14.689	12.24%
90	14.762	12.30%
91	14.820	12.35%
92	14.879	12.40%
93	14.942	12.45%
94	15.003	12.50%
95	15.061	12.55%
96	15.113	12.59%

Las 97 lecturas horarias registradas por el sistema IoT durante las 96 horas de inmersión. Las filas se van marcando conforme avanza la reproducción.

Ilustración 39. Tabla de datos obtenidos por el sensor IoT en el dashboard.

Curva de expansión — Deformación vs. tiempo

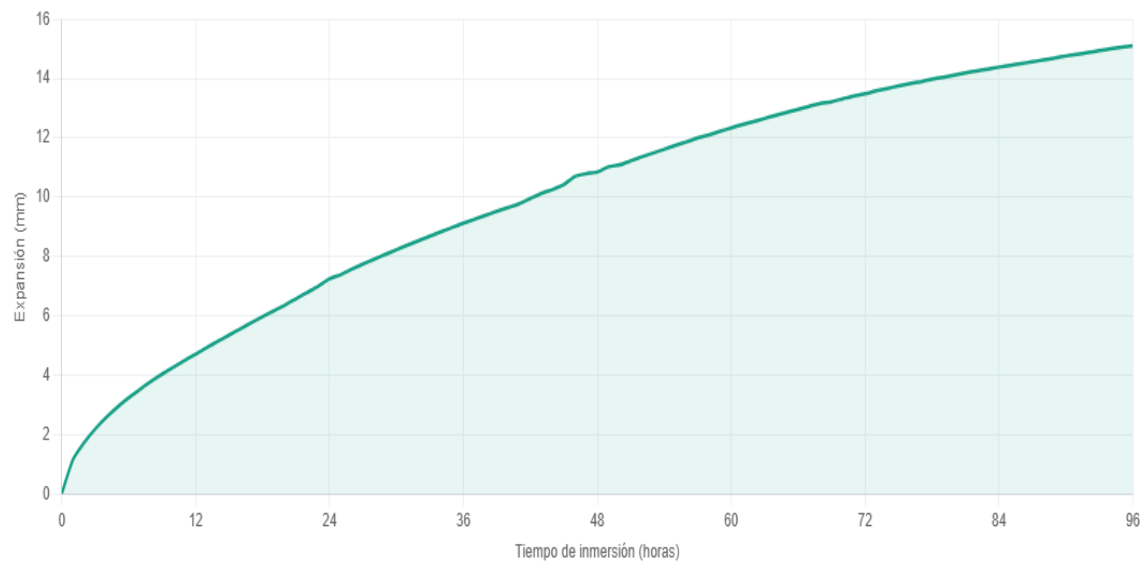


Ilustración 40. Gráfica de datos obtenidos por el sensor IoT en el dashboard

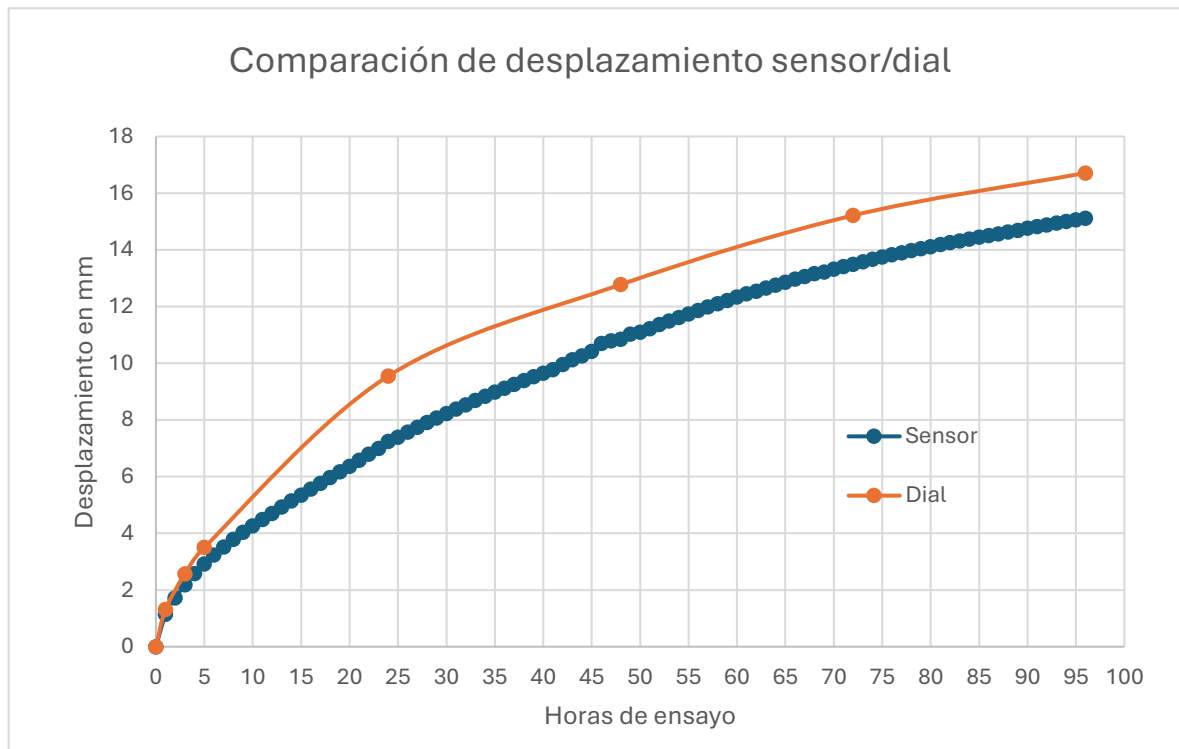


Ilustración 41. Gráfica comparativa del desplazamiento sensor/dial.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES

1. La muestra 1 (90.6% de finos, LL=82.3%, IP=51.5%) se ubica sobre la línea A, clasificado como CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad) y, bajo AASHTO, en el grupo A-7, en el límite entre A-7-5 y A-6, aunque con un comportamiento más cercano al A-7-5 debido a la proximidad de su IP al valor de LL-30. La muestra 2 (82.5% de finos, LL=79.7%, IP=40%) se posiciona bajo la línea A, resultando en una muestra de clasificación mixta MH-CH, y corresponde al subgrupo de A-7-5 en AASHTO. La muestra 3 (92.6% de finos, LL=59.8%, IP=29.3%) se ubica muy próxima a la línea A, clasificándola como CH-MH, es decir, intermedia, con un comportamiento predominante arcilloso pero sin descartar un componente limoso.

El límite de contracción, la muestra 3 presentó el valor más alto (14.25%), seguida de la muestra 2 (11.62%) y la muestra 1 (10.24%). Esta secuencia es coherente con los resultados de plasticidad, a mayor índice de plasticidad, menor es el límite de contracción, validando la consistencia de los ensayos de Atterberg y contracción realizados

2. El ensayo de Proctor modificado permitió establecer los índices de humedad óptima y densidad máxima de las tres muestras analizadas, evidenciando diferencias considerables en su comportamiento de compactación. La muestra 1 alcanza la mayor densidad seca máxima de 1.75 g/cm^3 con una humedad óptima de 24.77%, lo que indica una compactación eficiente pese a corresponder a una arcilla de alta plasticidad (CH). La muestra 2, en contraste, presenta la menor densidad seca máxima 1.264 g/cm^3 y requiere la mayor humedad óptima de 36.62%, un comportamiento consistente con su condición de transición MH-CH y con el elevado límite líquido observado previamente, que ya sugería una componente limosa o de mayor retención de agua dentro de su estructura. La muestra 3, con la densidad seca intermedia de

1.457 g/cm^3 y la humedad óptima más baja de 20.54% (CH-MH), que requiere menos agua para alcanzar su punto óptimo de compactación.

3. La categorización de las muestras de suelo demostró que los suelos en la Vía Circunvalación corresponden a estratos altamente expansivos. Al evaluar los porcentajes de hinchamiento del ensayo de CBR tras las 96 horas de inmersión, en el cual la muestra 1 alcanzó 12.43%, la muestra 2 llegó al 5.64% y la muestra 3 al 10.03% en los 56 golpes, y comparándolo con la tolerancia de la normativa que indica que un suelo mayor al 3% de hinchamiento es problemático, se pone en evidencia que las tres muestras superan con creces el límite de seguridad. Esto determina que el material contiene arcillas con minerales de alta expansividad, como la illita y montmorillonita, y lo clasifica como inadecuado para ser usado directamente como subrasante o capa estructural sin un tratamiento previo de estabilización o remoción.

4. El ensayo de azul de metileno permitió cuantificar la actividad química y la superficie específica de la fracción fina del terreno, confirmando una gran presencia de arcillas reactivas de la familia de las montmorillonitas. La muestra 2 registró el índice más crítico con un valor de azul de metileno de 135 mg/gr, seguido de la muestra 1 con 80 mg/gr y la muestra 3 con 50 mg/gr. Estos elevados niveles de adsorción molecular demuestran que el suelo posee una elevada capacidad de retención de agua en su estructura cristalina, justificando físicamente las deformaciones y agrietamientos que sufre la carpeta asfáltica de la vía en cuestión.

5. El ensayo de azul de metileno identificó a la muestra 2 como la de mayor actividad química pero el ensayo de expansión siguiendo el método CBR reveló que la muestra 1 desarrolla el mayor hinchamiento volumétrico. Esta particularidad confirma que el potencial expansivo de un estrato vial no está únicamente dictado por su capacidad de

absorción, sino que está fuertemente condicionado por factores macroestructurales del suelo compactado, como la granulometría, la relación de vacíos y demás condiciones que adopta el material al ser moldeado en el laboratorio.

6. La muestra 1 a los 56 golpes presentó el comportamiento de hinchamiento volumétrico más considerable del muestreo. Al alcanzar una deformación vertical de 14.173 mm a las 96 horas y de 14.935 mm a las 168 horas, arrojó un porcentaje de hinchamiento máximo del 12.43%, superando a la muestra 3 de 10.03% y a la muestra 2 de 5.64%. En base a este criterio, la muestra 1 fue seleccionada como el espécimen idóneo para someter a prueba el sistema de monitoreo continuo con el sensor electrónico.

7. El porcentaje de expansión aumenta en función directa de la energía de compactación aplicada. En la muestra 1 el hinchamiento empezó con 9.40% para 12 golpes, siguiendo al 10.25% para los 25 golpes y de 12.43% en los 56 golpes. Este comportamiento confirma la teoría de que las arcillas expansivas compactadas a mayores densidades secas acumulan una mayor tensión interna, liberando una presión de hinchamiento mucho más agresiva al saturarse.

8. El análisis comparativo entre el dial mecánico convencional y el sensor electrónico implementado demostró un alto nivel de proximidad en la descripción de la curva de hinchamiento a lo largo del tiempo. Ambas metodologías registraron con éxito las tres fases características del proceso expansivo: una absorción acelerada en las primeras 24 horas (registrando un 7.249 mm en el sensor frente a 9.550 mm en el dial) y una fase de crecimiento transitorio hasta las 48 horas (10.851 mm vs 12.776 mm) y una zona de estabilización en hacia las 96 horas (15.113 mm vs 16.713 mm). Esta total coherencia en la morfología de las curvas valida la capacidad del sensor para capturar el comportamiento dinámico del suelo en tiempo real.

9. El sensor registró datos ligeramente menores en comparación al dial, manteniendo una diferencia promedio estable a lo largo de todo el ensayo. El punto crítico de control en la hora 96 la lectura del sensor (15.113 mm) presentó una desviación de 1.6 mm respecto al dial (16.713 mm), lo cual representa una proximidad superior al 90% en la escala total de deformación. Esta mínima diferencia es atribuible a factores como la resistencia por fricción del vástago del sensor y la presión de contacto del dispositivo digital sobre el molde de CBR con la muestra arcillosa.

10. Los resultados confirman la hipótesis del trabajo, concluyendo que los sensores eléctricos en IoT poseen una alta confiabilidad técnica y un nivel de precisión compatible con los estándares de la ingeniería civil para la evaluación de suelos expansivos. El sistema automatizado demostró no sólo ser capaz de medir deformaciones milimétricas con un margen de error mínimo, si no que superó la principal limitación del ensayo de expansión tradicional siguiendo el método CBR al eliminar la necesidad de lecturas presenciales y permitir el monitoreo ininterrumpido del hinchamiento las 24 horas del día.

5. CAPÍTULO 6 – RECOMENDACIONES

1. Se recomienda revisar el diseño mecánico del sensor de desplazamiento lineal, ya que se observó una mayor rigidez o resistencia friccional en su punta en comparación con el dial mecánico convencional, lo cual atenuó ligeramente la magnitud del desplazamiento registrado en el ensayo. Se recomienda evaluar mecanismos de menor fricción, como guías lineales de rodamiento, o desarrollar un factor de calibración cruzada entre el sensor y el dial, de manera que las lecturas electrónicas reflejen con mayor exactitud la magnitud real del hinchamiento.
2. Se recomienda dar continuidad al desarrollo conjunto con la carrera de ingeniería Eléctrica, ampliando el dashboard web para incluir alertas automáticas configurables ante expansiones críticas, y explorar la transmisión remota de datos, características que consolidarían el aporte de este sistema como una herramienta de monitoreo geotécnico.
3. Se recomienda validar el sistema en otros tipos de suelos arcillosos con diferente grado de plasticidad y actividad mineralógica, con el fin de determinar si el nivel de confiabilidad demostrado en el estudio se mantiene consistente en escenario geotécnicos distintos a los de la vía Circunvalación -Manta, lo que respaldaría la innovación tecnológica como alternativa válida en la práctica de la ingeniería civil.
4. Se sugiere aplicar métodos de estabilización química como la adición de cal o cemento portland para modificar la estructura mineralógica de la arcilla y neutralizar su reactividad antes de colocar las capas de pavimento.
5. En suelos de alta actividad química se sugiere evaluarlos con un aumento en la concentración de la solución base si la prueba de goteo se prolonga

excesivamente, esto no afectará a los resultados ya que la fórmula trabaja con la concentración que se le dicte.

6. Que el equipo de sensores que se adquieran para futuros trabajos cuente con un desplazamiento mayor a 10 mm, ya que el hinchamiento de las arcillas locales supera fácilmente este desplazamiento máximo.
7. Adquirir una mayor cantidad de sensores para realizar análisis en simultáneo de distintas muestras y así no tener que esperar el transcurso de las 96 horas para evaluar otro estrato.

6. BIBLIOGRAFÍA

ABC Architectural Solutions. (2018). *Informe Técnico del Estudio de Suelo*. Manta.

Caceres, N. (s, f). *Compactación de suelos*.

https://es.slideshare.net/slideshow/compactacion-de-suelos-64087392/64087392?nway-content_model=D.

Capcha , J., Machaca, R., Sulca , B., & Avila, J. (2020). *Laboratorio N°3 Proctor Modificado , Universidad tecnológica del Perú*.

<https://es.scribd.com/document/731100505/LABORATORIO-PROCTOR-MODIFICADO-final-2>.

Chen, H. (1975). *Foundation on expansive soil*. New York: Elsevier Scientific Company.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Learning.

Duque Escobar, G., & Escobar Potes, C. E. (2023). *Mecánica de los suelos*. Manizales.

Espinoza, A. (2015). *Caracterización de arcillas expansivas en el sector Salapa*.

Espinoza, A. (2015). “Caracterización de arcillas expansivas en el sector Salapa”.

Espinoza, Á. (2015). *Caracterización de arcillas expansivas en el sector Salapa*. Loja.

Intriago, C. M. (2026). Intervención urgente ante socavón en vía Circunvalación por lluvias intensas. *EL DIARIO*. Obtenido de <https://www.eldiario.ec/manta/intervencion-urgente-ante-socavon-en-via-circunvalacion-por-lluvias-intensas-01032026/>

Jiangxi SOP Precision Intelligent Manufacturing Technology Co., L. (2026). *Sensor de desplazamiento lineal: principios, tipos y aplicaciones industriales*. Obtenido de

<https://www.sopsensors.com/es/blog/linear-displacement-sensor-principles-types-and-industrial-applications>

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2001). *Mecánica de Suelos: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Limusa.

Li, J., & Cameron, D. (2002). *Case Study Of House Damaged by Expansive Soils*. J. Perform. Constr. Facil.

Machuca Mena, M., & Santillán Goya, E. (2024). *Caracterización el grado de expansión de las arcillas del sector "El Cerro" en el tramo de vía Rocafuerte - Tosagua Km 184 al Km 188 y su afectación a la infraestructura vial*. Manta: Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Paneque, G., & González, F. (1957). *Composición mineralógica y génesis de algunos tipos de suelos calizos béticos. I. Mineralogía de las fracciones gruesas (arenas)*. CSIC - Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal.

Paspuel, K. (2024). *Análisis de la propagación y distorsión de señales eléctricas en suelos arcillosos remoldeados de la formación Tosagua mediante procesamiento computacional de señales*.
<https://repositorio.ulead.edu.ec/handle/123456789/6900?mode=full>.

Pino González, D., Esteras González, F., & Jiménez Sáez, R. (2018). *Estudio comparativo del ensayo de azul de metileno según las normas NLT-171 y UNE 83-130*. Revista Digital Del Cedex.

Santamarina, C., & Narsilio, G. (2010). *Clasificación de suelos: Fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones*. Atlanta.

Soto, M. A. (9 de 12 de 2008). *Ciencia de la tierra* . Obtenido de GEOTECNIA EN

SUELOS NO SATURADOS :

<https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/2315/3717>

Tipan Erazo, T., & Tarambís Rodríguez, J. (2025). *EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD (E50) EMPLEANDO EL ENSAYO TRIAXIAL UU EN SUELOS COHESIVOS DE DOS SECTORES DEL SUR DE QUITO, COMPACTADOS MEDIANTE EL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO [TESIS DE GRADO, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA]*.

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29541/1/TTS2087.pdf>.

Torres, J. d. (2005). *Estudio de fatiga de expansión en suelos arcillosos*. Santiago de Querétaro.

Universidad Politécnica de Cataluña. (s. f.). *Introducción a los suelos no saturados*.

https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250230/2013/tema_10_suelos_no_saturados.pdf. Obtenido de Introducción a los suelos no saturados:

https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250230/2013/tema_10_suelos_no_saturados.pdf

Urdanivia, H. (2019). *Relación entre el tipo de suelo (SUCS y AASHTO) y el asentamiento de suelos para determinar asentamientos diferenciales en cimientos de concreto armado*. Cerro de Pasco.

7. ANEXOS.

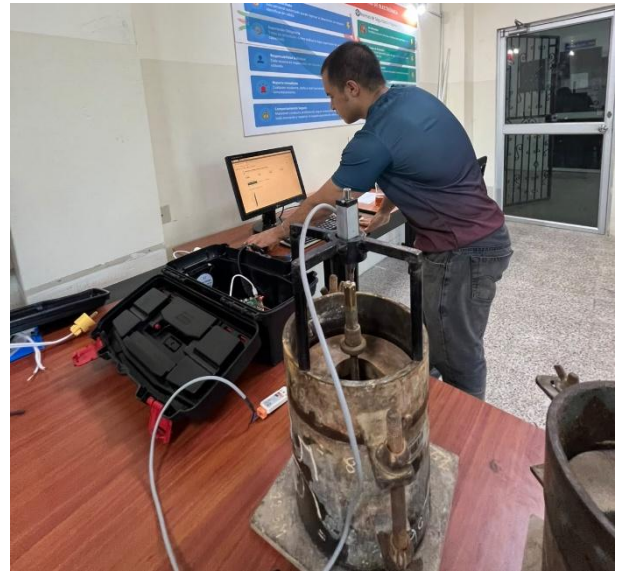


Ilustración 42. Instalación del sensor IoT en los moldes CBR.

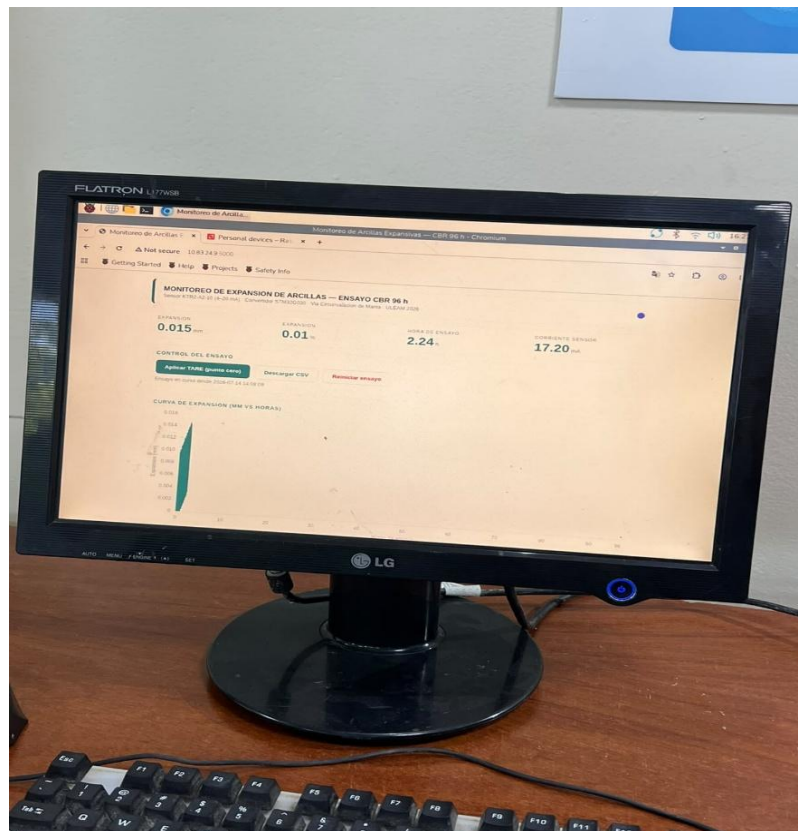


Ilustración 43. Aplicación (dashboard web) implementada para las lecturas de desplazamiento.

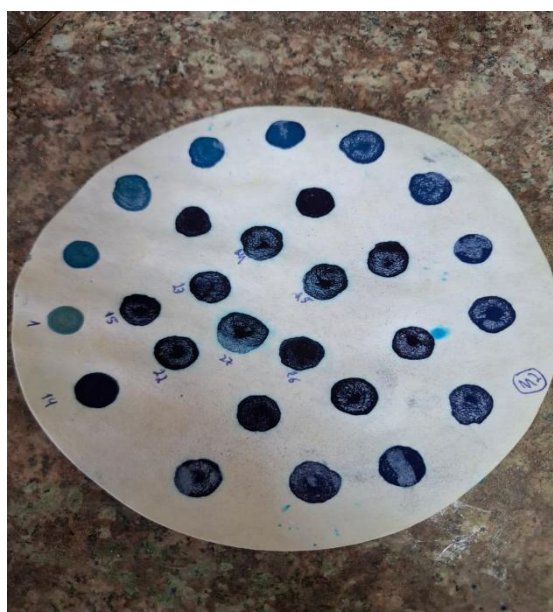


Ilustración 44. Sensor IoT de desplazamiento lineal



Ilustración 45. Muestra 1 sumergida junto al sensor para el comienzo de la lectura.

✚ Prueba azul de metileno.



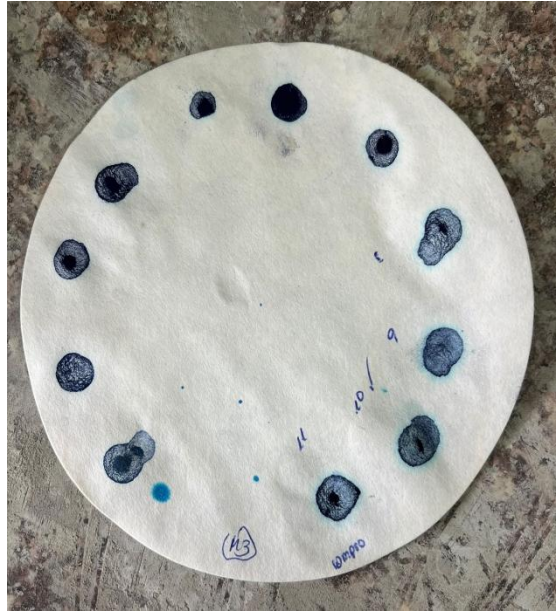


Ilustración 46. Pruebas en las muestras 1, 2 y 3 de azul de metileno

✚ Otros ensayos.



Ilustración 47. Ensayo de Proctor modificado



Ilustración 48. Prueba de expansión en las muestras 1, 2 y 3.



Ilustración 49. Resultado límite de contracción y elaboración del ensayo de límite de plasticidad.