



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARACTERIZACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS EN LA
ZONA DE CHALLUABAMBA Y MIRAFLORES DE LA CIUDAD DE CUENCA.**

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

AUTOR: BRYAM FERNANDO CAMPOVERDE ZEAS.

TUTOR: ING.CRISTIAN DANILO BUSTOS CABRERA MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Bryam Fernando Campoverde Zeas con documento de identificación N° 0150563468 manifiesto que:

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

Cuenca, 15 de julio del 2024

Atentamente,



Bryam Fernando Campoverde Zeas

0150563468

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

Yo, Bryam Fernando Campoverde Zeas con documento de identificación N° 0150563468, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de Investigación: “Caracterización y Estabilización de Suelos Expansivos en la Zona de Challuabamba y Miraflores de la ciudad de Cuenca.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 15 de Julio del 2024

Atentamente,



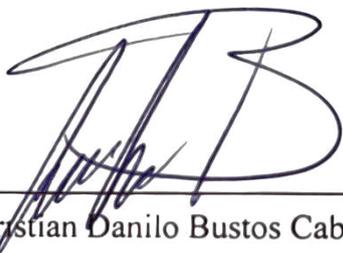
Bryam Fernando Campoverde Zeas
0150563468

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Danilo Bustos Cabrera con documento de identificación N° 0301288262, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CARACTERIZACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS EN LA ZONA DE CHALLUABAMBA Y MIRAFLORES DE LA CIUDAD DE CUENCA., realizado por Bryam Fernando Campoverde Zeas con documento de identificación N° 0150563468, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de Julio del 2024

Atentamente,



Ing. Cristian Danilo Bustos Cabrera MSc.

0301288262

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en la caracterización y estabilización de suelos expansivos en la ciudad de Cuenca, clasificados según sus características expansivas. Se analizaron dos suelos naturales de los sectores de Challuabamba y Miraflores, pertenecientes a las formaciones geológicas de Loyola y arcillas Varvadas, respectivamente. En Challuabamba, se observó un 77.2% de finos, mientras que en Miraflores fue del 85.2%. La cantidad de partículas de tamaño arcilla fue mayor en Miraflores (53.12%) en comparación con Challuabamba (37.6%).

La clasificación AASHTO identificó estos suelos como arcillosos, mientras que según la SUCS, ambos fueron clasificados como arcillas de alta plasticidad. Los límites de Atterberg y otros ensayos mostraron que Challuabamba tiene un límite líquido de 72.35%, un límite plástico de 30.97%, y una presión de expansión de 69.95 gr/cm². Por otro lado, Miraflores presentó un límite líquido de 63.87%, un límite plástico de 21.71%, y una presión de expansión de 76.31 gr/cm².

Los ensayos de expansión libre revelaron que el suelo de Miraflores tiene el mayor índice de expansión (82.1%), mientras que Challuabamba mostró un 53.8%. Para reducir el potencial expansivo, se aplicaron estabilizantes como CKD y polvo de mármol, observando que la densidad seca máxima disminuye y la humedad óptima de compactación aumenta con el uso de estos aditivos. El CKD se destacó por su capacidad para reducir significativamente los límites de Atterberg y el hinchamiento libre, además de mejorar la resistencia y durabilidad del suelo.

El uso de CKD y MWP demostró ser una técnica eficaz y ecológica para estabilizar suelos expansivos, reduciendo el índice de hinchamiento libre y la capacidad de cambio de volumen. CKD mostró una notable mejora en el índice de soporte de California (CBR) y en la resistencia no consolidada no drenada (UCS), haciendo que estos suelos sean más adecuados para la construcción de carreteras rurales. El polvo de mármol, al ser un subproducto, ofrece una opción sostenible y efectiva para la estabilización del suelo, controlando la contracción y mejorando las propiedades del suelo expansivo.

En resumen, esta investigación no solo identifica y clasifica suelos expansivos en Cuenca, sino que también demuestra cómo la adición de estabilizantes específicos puede transformar estos suelos problemáticos en materiales viables para la construcción, promoviendo técnicas sostenibles y eficientes.

Tabla de contenido

1.INTRODUCCION	12
1.1 Justificación	13
1.2 Antecedentes	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	15
1.4 Alcance	15
2.MARCO TEORICO	16
2.1 Zonas de estudio	16
2.1.1 Challuabamba	16
2.1.2 Miraflores	18
2.2 Caracterización de suelos	19
2.3 Suelos Expansivos	20
2.3.1 Concepto	20
2.3.2 Proceso de expansión	20
2.3.3 Problemas relacionados	21
2.3.4 Recomendaciones de construcción	22
2.4 Arcillas	22
2.4.1 Propiedades de la arcilla	23
2.4.2 La identificación en campo de suelos arcillosos	24
2.4.3 Minerales arcillosos	25
2.4.4 Estabilización de arcillas expansivas	27
2.4.5 Alternativas de estabilización	27
3.MATERIALES Y METODOS	29
3.1 Caracterización del suelo	29
3.1.1 Granulometría	29
3.1.2 Hidrómetro	31
3.1.3 Clasificación del suelo	31
3.2 Expansividad	33
3.2.1 Limites de Atterberg	33
3.2.2 Expansión Libre	35

3.2.3 Expansión controlada.....	36
3.3 Correlaciones	37
3.4 Compactación Proctor modificado.....	37
3.5 Relación de soporte de suelo (CBR de laboratorio)	38
3.6 Procesos para la estabilización del suelo.....	39
3.6.1 Mecanismo de expansión del suelo expansivo	39
3.6.2 Métodos y aditivos comúnmente utilizados para la estabilización.....	40
3.6.3 Estabilizantes a usar	41
3.6.4 Dosificación	45
4 RESULTADOS	47
4.1 Caracterización	47
4.1.1 Granulometría.....	47
4.1.2 Hidrómetro.....	48
4.2 Expansividad.....	49
4.2.1 Límites de Atterberg.....	49
4.3 Clasificación de suelos	51
4.4 Expansividad.....	53
4.4.1 Expansión Libre.....	54
4.4.2 Expansión controlada.....	56
4.5 Tipo de mineral predominante	59
4.6 Resumen resultados finales de caracterización	60
4.7 Estabilización de la zona de Miraflores	61
4.7.1 Estabilización con polvo de mármol (MWP).....	61
4.7.2 Estabilización con polvo de horno de cemento (CKD).....	62
4.7.3 Dosificación	63
4.7.4 Límites de Atterberg.....	63
4.7.5 Expansión Libre y Controlada	66
4.7.6 Compactación Proctor estándar modificada	70
4.7.7 CBR.....	72
5. CONCLUSIONES	75
6. RECOMENDACIONES	77
7. REFERENCIAS.....	79
8. ANEXOS	82

Anexo 1	82
Granulometría por lavado y Límites de Atterberg	82
Ensayo Hidrómetro	89
Ensayos de Expansividad en muestras Naturales	90
Ensayo de Proctor Modificado y CBR en Muestras Naturales	96
Ensayos de Límites de Atterberg en Suelos Estabilizados	105
Ensayos de Expansividad en Suelos Estabilizados	106
Proctor Modificado y CBR en Suelos Estabilizados	111

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de Estabilizantes.....	9
Tabla 2. Porcentaje que pasa el tamiz N 200.....	48
Tabla 3. Porcentajes de arcilla.....	49
Tabla 4. Parámetros para clasificar a los suelos expansivos en base a su contenido de arcilla y límites de Atterberg (Day Robert,2000)	50
Tabla 5. Resultados Límites de Atterberg.....	50
Tabla 6. Propiedades clasificación AASHTO Challuabamba.....	51
Tabla 7. Propiedades clasificación SUCS Challuabamba	52
Tabla 8. Propiedades clasificación AASHTO Miraflores.....	52
Tabla 9. Propiedades clasificación SUCS Miraflores.....	53
Tabla 10. Humedad Inicial y final para la muestra de Miraflores.....	55
Tabla 11. Lecturas para la muestra de Miraflores.....	55
Tabla 12. Humedad Inicial y Final para la muestra de Challuabamba.....	55
Tabla 13. Lecturas para la muestra de Challuabamba.....	56
Tabla 14. Resultados del Ensayo de expansión Libre.....	56
Tabla 15. Humedad Inicial y Final para la muestra de Miraflores.....	57
Tabla 16. <i>Lecturas de ensayo de Expansión Controlada para la muestra de Miraflores.....</i>	<i>58</i>
Tabla 17. Humedad Inicial y Final para la muestra de Challuabamba en el ensayo de Expansión Controlada.....	57
Tabla 18. Lectura del Ensayo de Expansión controlada para la muestra de Challuabamba.....	58
Tabla 19. Resultados del ensayo de Presión de Expansión.....	59
Tabla 20. Tipo de Mineral para las muestras.....	60
Tabla 21. Clasificación grado de expansividad según expansión controlada.....	60
Tabla 22. Resultado final de valores de expansividad.....	61
Tabla 23. Comparación de resultados de los límites de Atterberg entre el suelo natural y suelo estabilizado al 10% de CKD	63
Tabla 24. Comparación de resultados de los límites de Atterberg entre el suelo natural y suelo estabilizado al 12% de MWP.....	64
Tabla 25. Lectura de ensayo de Expansión Libre con 10% de CKD	66
Tabla 26. Lectura de ensayo de Expansión Libre con 12% de MWP.....	67
Tabla 27. Lectura ensayo de expansión controlada con 10% de CKD.....	67
Tabla 28. Lectura ensayo de expansión controlada con 12% de MWP	68
Tabla 29. Comparación resultados de los ensayos de expansividad entre el suelo natural y suelo estabilizado al 10% de CKD.....	68
Tabla 30. Comparación resultados de los ensayos de expansividad entre el suelo natural y suelo estabilizado al 12% de MWP	68
Tabla 31. Comparación resultados de los ensayos de Proctor Modificado entre el suelo natural y suelo estabilizado al 10% de CKD.....	70
Tabla 32. Comparación resultados de los ensayos de Proctor Modificado entre el suelo natural y suelo estabilizado al 12% de MWP	71

Tabla 33. Comparación resultados de CBR entre muestra natural y estabilizada con 10 % de CKD y 12 % de MWP	73
Tabla 34. Resumen de los resultados de estabilización	74

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación de la extracción de muestras sector Challuabamba (Fuente: Autor)...	17
Ilustración 2. Extracción de la muestra en el sector de Challuabamba	18
Ilustración 3. Extracción de la muestra Sector Miraflores.	18
Ilustración 4. Ubicación de extracción de muestras sector Miraflores.....	19
Ilustración 5. Límites de tamaño de suelos de (Das,2015)	23
Ilustración 6. Tetraedro de sílice y Lamina de sílice (Das,2015).	25
Ilustración 7. Octaedro de alúmina y lamina octaédrica (Das,2015)	26
Ilustración 8. Polvo de Mármol.....	42
Ilustración 9. Polvo de Horno de Cemento.....	45
Ilustración 10. Porcentaje de Estabilización con Polvo de Horno de Cemento (Sandoval,2012)	46
Ilustración 11. Resultado de Granulometría por tamizado para la muestra de Miraflores	47
Ilustración 12. Resultado de Granulometría por tamizado para la muestra de Challuabamba.	48
Ilustración 13. Resultados granulometría por hidrómetro	49
Ilustración 14. Clasificación del potencial expansivo del suelo (ASTM D-4829).	54
Ilustración 15. Gradiente mineral (Marín Nieto,1991)	59
Ilustración 16. Limite Líquido (Natural vs Estabilizado)	64
Ilustración 17. Limite Plástico (Natural vs Estabilizado).....	65
Ilustración 18. Índice de Plasticidad (Natural vs Estabilizado).	65
Ilustración 19. Expansión Libre (Natural vs Estabilizado).....	69
Ilustración 20. Expansión Controlada (Natural vs Estabilizado).	69
Ilustración 21. Máxima Densidad Seca (Natural vs Estabilizado).....	71
Ilustración 22. Optimo Contenido de Humedad (Natural vs Estabilizado).....	72
Ilustración 23. CBR (Natural vs Estabilizado).	73

1. INTRODUCCION

El suelo es un factor importante en los trabajos de ingeniería civil, debido a que es el soporte de todo tipo de infraestructuras. Por lo tanto, el terreno donde se construirá la estructura debe poseer buenas condiciones para asegurar una buena resistencia, durabilidad y estabilidad para cumplir con las demandas respectivas (Sofwan & Nurdin, 2020)

El crecimiento urbano en Cuenca está avanzando hacia zonas que anteriormente no estaban urbanizadas, lo que implica una falta de registros de proyectos constructivos y experiencia previa con respecto al tipo y comportamiento del suelo en estas nuevas tierras. En este contexto, es crucial colaborar en la identificación de áreas que podrían generar problemas debido a la expansión del suelo.

Según el Mapa Informativo Digital de Elevaciones de la Alcaldía de Cuenca (Alcaldía de Cuenca, 2017), la ciudad de Cuenca cuenta con zonas catalogadas como inestables desde el punto de vista geológico, así como zonas propensas a hundimientos. Es vital señalar que este mapa no proporciona información específica sobre la presencia de suelos expansivos en la ciudad.

Los suelos expansivos exhiben cambios significativos de hinchamiento y contracción en respuesta a los cambios estacionales en el contenido de humedad. Dado su alcance global, los problemas asociados con estos cambios de volumen han recibido una considerable atención. Además, los suelos expansivos se encuentran en situaciones geotécnicas y estructurales desafiantes a gran escala en todo el mundo. Las deformaciones del suelo provocadas por los cambios de volumen causan problemas masivos en las estructuras de ingeniería liviana, las cuales frecuentemente colapsan al verse expuestas a los desplazamientos de estos suelos en expansión. Las fallas asociadas con la expansión de los suelos se deben a la falta de una evaluación temprana de la existencia y magnitud de los cambios de volumen en estos suelos, más que a la falta de soluciones de la ingeniería (Florez-Gongora et al., 2016).

Según la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, alrededor del 25% de las estructuras tienen algún tipo de daño causado por la expansión de los suelos. Como resultado, es indispensable mejorar las propiedades fisicoquímicas de los suelos en expansión para hacerlos aptos para proyectos de ingeniería civil. Es necesario investigar nuevas soluciones que hagan uso de los recursos locales, teniendo en cuenta que los costos más significativos están asociados con las materias primas y la construcción. El daño causado por las estructuras construidas en estos suelos problemáticos está impulsando la investigación de estrategias para mejorar las propiedades de ingeniería (Shah et al., 2023).

La estabilización del suelo es un procedimiento geotécnico que involucra métodos mecánicos, químicos u otros con el objetivo de mantener el equilibrio, mejorar las características de ingeniería, limitar la absorción de agua y mejorar la compresibilidad del suelo. Este enfoque se emplea cuando la sustitución del suelo no es técnica o

medioambientalmente viable, en muchos casos no es rentable. No sólo ayuda a mejorar los suelos pobres, sino que también evita daños medioambientales y reduce los costes del proyecto. La estabilización del suelo se usa comúnmente para mejorar las propiedades geotécnicas de las arcillas. Una estrategia actual para mejorar el suelo es reemplazar el suelo suelto con materiales cohesivos, como hormigón, suelo estabilizado y geotextiles (Suwantara et al., 2019).

La práctica de retirar el suelo pobre y sustituirlo por suelo bueno es popular para proyectos menores, pero para grandes proyectos de infraestructuras como pavimentos, este método es poco realista y caro debido al gran volumen implicado. La estabilización con aglutinantes convencionales como la cal y el cemento es una opción exitosa y ampliamente utilizada para este tipo de suelos. Sin embargo, los inconvenientes de estos métodos son su elevado coste y las emisiones de carbono inherentes.

1.1 Justificación

La ciudad de Cuenca, situada en Ecuador, se caracteriza por sufrir inestabilidades geológicas y deslizamientos, según el mapa de Información Digital de Elevaciones de la Alcaldía de Cuenca. Estos problemas representan un riesgo significativo para las estructuras en la ciudad. Aunque el mapa no identifica específicamente suelos expansivos, es importante tener en cuenta que su presencia puede no estar documentada o no ser evidente en el contexto geotécnico local.

El objetivo de este proyecto de titulación es caracterizar y analizar los suelos expansivos en Cuenca, buscando determinar estabilizantes que reduzcan su potencial expansivo. Dada la limitada disponibilidad de información sobre arcillas expansivas y las limitaciones en la construcción de edificaciones pequeñas, se requiere una investigación exhaustiva. Es esencial comprender y caracterizar adecuadamente estos suelos para evaluar su riesgo potencial en las estructuras existentes y futuras construcciones.

La justificación de este trabajo radica en la importancia de comprender los suelos expansivos en Cuenca. Esto permitirá evaluar su impacto en las estructuras y la infraestructura existente, así como desarrollar estrategias para minimizar los efectos adversos y garantizar la seguridad y durabilidad de las construcciones en la zona. Se analizarán diferentes métodos de caracterización de suelos expansivos, comparando sus resultados y evaluando su utilidad y facilidad de ejecución.

Esta investigación llenará un vacío de conocimiento relevante sobre la presencia y características de los suelos expansivos en Cuenca. Con los resultados obtenidos, se podrá tomar decisiones fundamentadas en el diseño y determinación de estructuras en áreas de inestabilidad geológica y deslizamientos. Además, se buscará evaluar los avances recientes en la estabilización de suelos expansivos mediante el uso de aditivos, comparando su efectividad con los métodos tradicionales.

1.2 Antecedentes

En el contexto de la investigación sobre la caracterización y extensión de suelos expansivos, se han llevado a cabo diversos estudios previos que se han centrado en diferentes aspectos de este desafío geotécnico. Sin embargo, muchos de estos estudios se han limitado a una caracterización básica de los suelos expansivos o han utilizado métodos convencionales de referencia. Por lo tanto, es necesario adoptar un enfoque más actualizado y específico que aborde los avances recientes en ambos aspectos.

Un antecedente relevante para este trabajo de titulación es el estudio realizado por (Bravo & Orellana, 2019), titulado "Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca". En dicho estudio, se realizó una caracterización exhaustiva de los suelos expansivos en una región geográfica similar. Su objetivo principal fue comprender las propiedades geotécnicas y geomecánicas de estos suelos para evaluar su comportamiento y el riesgo asociado a las estructuras construidas sobre ellos.

Por otro lado, en un estudio anterior realizado por (Idrovo, 2019), titulado "Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca", se investigaron métodos convencionales para la precisión de los suelos expansivos, como la adición de cemento y la compactación controlada. Si bien este estudio proporciona información valiosa sobre la eficacia de estos métodos para mejorar los suelos expansivos, no aborda los avances más recientes en términos de técnicas y aditivos de estabilización.

En este trabajo, se busca abordar estas limitaciones y aprovechar los avances más recientes en estabilización, caracterización y extensión de suelos expansivos. Se centrará en la aplicación de métodos y aditivos innovadores que han emergido en años recientes, con el propósito de mejorar las propiedades geotécnicas de estos suelos y reducir su potencial de expansión. Además, se realizará una caracterización exhaustiva de los suelos expansivos en la zona de estudio, teniendo en cuenta tanto las propiedades físicas como las propiedades químicas y mineralógicas.

Se enfatiza la necesidad de abordar tanto la caracterización como la extensión de los suelos expansivos utilizando enfoques y avances más recientes en el campo, superando las limitaciones de los estudios previos y ofreciendo nuevas perspectivas y soluciones para abordar este problema geotécnico en la ciudad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

- Seleccionar un método eficaz de estabilización que reduzca los cambios de volumen y mejore la resistencia y estabilidad de los suelos.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Realizar ensayos de caracterización y expansibilidad en muestras de suelo seleccionadas de áreas de desarrollo urbano de la ciudad de Cuenca, con el fin de determinar los valores característicos de expansión de los suelos en la zona.
- Utilizar los resultados de los ensayos de expansibilidad y caracterización de los suelos para analizar diferentes métodos de estabilización de suelos expansivos, comparando sus resultados y evaluando su utilidad y facilidad de ejecución.

1.4 Alcance

Esta tesis se centrará en la ciudad de Cuenca, Ecuador, específicamente en áreas de desarrollo urbano donde se sospecha la presencia de suelos expansivos. La selección de estas áreas se basará en una revisión del Mapa Informativo Digital de Elevaciones de la Alcaldía de Cuenca y otros estudios geotécnicos pertinentes. La investigación no abarcará otros tipos de suelos problemáticos que puedan existir en la región.

Para lograr una comprensión detallada de los suelos expansivos en Cuenca, se realizarán ensayos de caracterización física y química en muestras de suelo seleccionadas. Estos ensayos incluirán pruebas de laboratorio para determinar la expansibilidad, la plasticidad, la granulometría y otros parámetros geotécnicos relevantes. El objetivo es obtener una descripción exhaustiva de las propiedades de los suelos y su potencial expansivo.

En cuanto a la estabilización de suelos, se analizarán métodos innovadores que emplean aditivos recientemente desarrollados. Se evaluará la eficacia de estos métodos en términos de reducción de la expansibilidad y mejora de la resistencia y estabilidad del suelo. La comparación y evaluación de estos métodos se realizará teniendo en cuenta la facilidad de ejecución, los costos involucrados y la sostenibilidad ambiental.

Los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización y de las pruebas de estabilización serán comparados y evaluados para determinar su efectividad. Este análisis permitirá identificar las mejores prácticas y técnicas para la estabilización de suelos expansivos en Cuenca. Sin embargo, la implementación de soluciones a gran escala y la evaluación de su efectividad en el campo no serán abordadas en este trabajo de titulación, y se considerarán como recomendaciones para investigaciones futuras.

Finalmente, la contribución principal de esta investigación será llenar el vacío de conocimiento existente sobre la presencia y características de suelos expansivos en Cuenca. Los resultados proporcionarán una base sólida para la toma de decisiones en proyectos de ingeniería civil y el desarrollo urbano en áreas con riesgo potencial de inestabilidad geotécnica, asegurando así la seguridad y durabilidad de las construcciones en la región.

2. MARCO TEORICO

En esta sección, se abordará las definiciones pertinentes para el análisis de suelos expansivos y las áreas elegidas para la recolección de muestras. Se ofrecerá una breve descripción de cada zona, basada principalmente en investigaciones previas.

2.1 Zonas de estudio

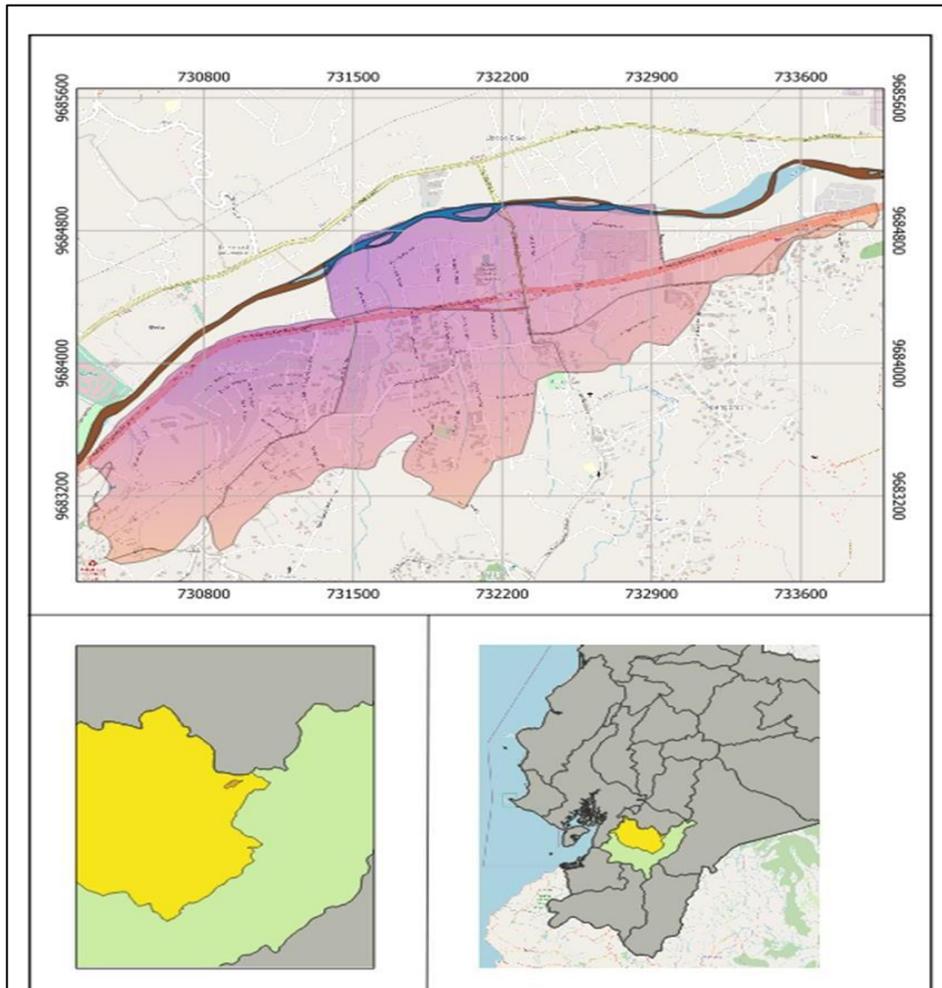
En esta investigación se han seleccionado las áreas de Challuabamba y Miraflores, situadas en el cantón Cuenca, provincia de Azuay, Ecuador. La elección de estas zonas se debe a su clasificación como áreas inestables, lo que presenta retos importantes para la construcción y la estabilidad de las infraestructuras. Challuabamba, al noreste de Cuenca, ha visto un rápido crecimiento en términos residenciales y comerciales en los últimos años, haciendo urgente la necesidad de comprender y manejar los riesgos asociados con los suelos expansivos. Por su parte, Miraflores, ubicada al oeste del centro de Cuenca, es una mezcla de barrios consolidados y nuevas urbanizaciones, también afectada por la inestabilidad del suelo. Este estudio pretende realizar un análisis detallado de las características de los suelos expansivos en estas localidades y evaluar métodos efectivos de estabilización para reducir los riesgos relacionados.

2.1.1 Challuabamba

En la zona de Challuabamba, el ingeniero Vélez (2012) ha realizado estudios preliminares que describen los problemas presentes en la construcción de viviendas. En su estudio titulado "Verificación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índice en suelos del sector Challuabamba, Cuenca, recomendaciones para la construcción de cimentaciones," Vélez proporciona recomendaciones específicas de construcción para este tipo de suelo.

Ilustración 1

Ubicación de la extracción de muestras sector Challuabamba



Las muestras recolectadas en la zona de Challuabamba se hallan en las capas geológicas de Loyola (ML) y Azogues (MAZ). De acuerdo con el mapa geológico de Azogues, la formación Loyola data del Mioceno Inferior, donde es una formación sedimentaria clástica de grano fino, compuesta principalmente de lutitas y limolitas meteorizadas. Las lutitas presentan tonos de gris oscuro, amarillo claro y rojizo, mientras que las arcillas derivadas de las limolitas exhiben colores predominantes blanco y habano. Tipo de suelo compuesto por limolitas, lutitas y areniscas de grano fino, con betas de carbón en la parte media; en la parte superior se encuentra una arenisca tobácea gruesa de color café, con un espesor aproximado de 2.200 m. El suelo es poroso, pero tiene baja permeabilidad, ya que el nivel freático es poco profundo. Se emplea en rellenos mezclados con areniscas, es sensible a la humedad y permite una excavación fácil (Morales & Pillalazo, 2021)

Ilustración 2

Extracción de la muestra en el sector de Challuabamba



Un rasgo distintivo de esta formación es la presencia abundante de yeso, especialmente en áreas alteradas, distribuido en la mayoría de los niveles. La estructura del suelo exhibe diversos sistemas de estratificación, fracturación y desecación.

2.1.2 Miraflores

En términos del barrio de Miraflores, se asienta sobre una formación de varves formada por capas alternadas de limo y arcilla. Según a (Erazo,2007), cuando el suelo está seco, no hay problemas de excavación. Sin embargo, si el suelo entra en contacto con el agua, puede tener problemas de expansión

Ilustración 3

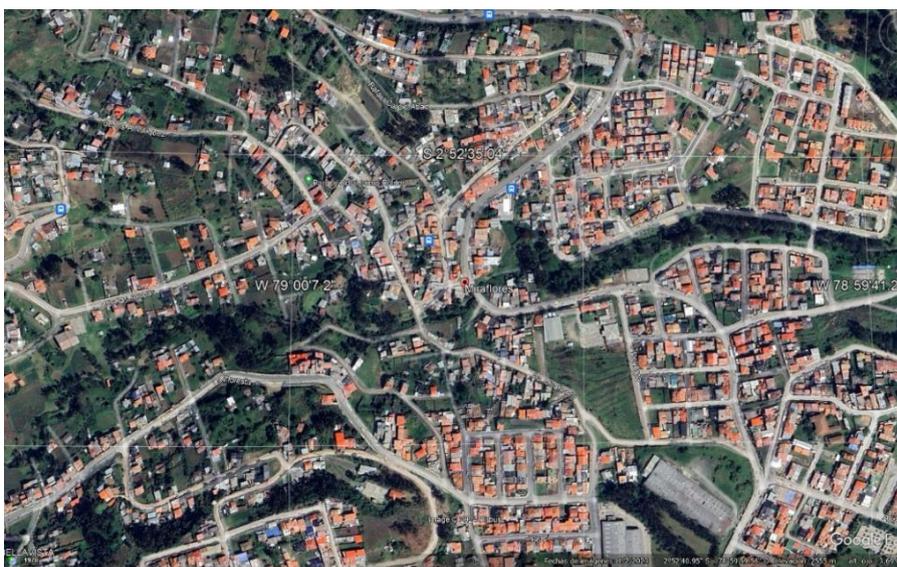
Extracción de la muestra Sector Miraflores.



En la región de Miraflores, se encuentran Arcillas Varvadas (Qv), que constituyen un depósito estratificado de arcillas, limos y limolitas con alta capacidad de expansión. Estas muestran tonalidades que van desde un habano claro hasta un habano oscuro y generalmente están cubiertas por una capa delgada de residuos de terraza. En estado seco, las arcillas varvadas presentan una consistencia de mediana a baja y son susceptibles a la saturación y al remoldeo (Morales & Pillalazo, 2021)

Ilustración 4

Ubicación de extracción de muestras sector Miraflores



2.2 Caracterización de suelos

La caracterización de suelos es un proceso esencial donde se investigan y evalúan diversas propiedades y características del suelo para entender su comportamiento y sus posibles aplicaciones. Durante este proceso, se realizan diferentes pruebas y análisis para recolectar información precisa sobre el suelo. Algunas de las propiedades que se evalúan en la caracterización de suelos incluyen la granulometría, que nos dice qué cantidad de arena, limo y arcilla hay en el suelo; la plasticidad, que nos indica cómo responde el suelo a la humedad y cuán maleable es; la permeabilidad, que mide la capacidad del suelo para dejar pasar el agua; la densidad, que nos habla de la compacidad del suelo; y la resistencia, que muestra la capacidad del suelo para soportar cargas (Almuaythir & Abbas, 2023).

Es un proceso fundamental para el diseño y construcción de proyectos civiles, la agricultura, la planificación urbana, la conservación del medio ambiente y otros campos relacionados con la tierra y la geotecnia.

Se deben realizar pruebas previas con el fin de proporcionar una clasificación inicial de la clase de suelo con el que se realizarán los estudios. Las pruebas abordan el método cribado, el método hidrométrico, la determinación del límite líquido, límite plástico,

clasificación de suelos. Los detalles de cada estudio se incluyen en la sección Materiales y métodos de investigación.

2.3 Suelos Expansivos

2.3.1 Concepto

Los suelos expansivos son tipos de suelos que tienen la particularidad de aumentar considerablemente su volumen al absorber agua, generando hinchamiento, y luego disminuir su volumen al secarse. Este fenómeno es causado por minerales como las arcillas expansivas, que tienen una estructura especial que les permite retener agua entre sus partículas. Cuando el suelo está seco, puede contraerse y generar grietas en la superficie. Sin embargo, al absorber agua, las partículas de arcilla se expanden, ejerciendo presión hacia arriba, lo que puede dañar las estructuras construidas sobre este tipo de suelo, como cimientos, pavimentos, muros y otros elementos de construcción (Osman, 2018).

La presencia de suelos expansivos plantea desafíos en la ingeniería y construcción, ya que los cambios de volumen pueden causar asentamientos y daños en las estructuras, afectando su estabilidad y durabilidad. Por tanto, es crucial realizar una caracterización adecuada de estos suelos y aplicar técnicas de estabilización para mitigar sus efectos adversos y garantizar la seguridad de las construcciones sobre ellos.

2.3.2 Proceso de expansión

La estructura interna del suelo presenta una red cristalina con cargas positivas y negativas desequilibradas. Las partículas de arcilla suelen tener una forma laminar, con cargas positivas en los extremos y una mínima presencia de cargas negativas, mientras que las caras de las láminas están dominadas por cargas negativas (Delgado Trujillo, 1986). Propone mecanismos que restringen la expansión:

-Partículas de arcilla (Hidratación): La partícula de arcilla tiene objetivo de equilibrar las cargas eléctricas internas, por otro lado, atrae las moléculas de H₂O, debido a su estructura laminar y alta superficie específica, lo que resulta en la creación de múltiples capas. Estas capas de H₂O que adsorben permite que las reacciones de hidratación ocurran de manera eficiente cuando se añaden estabilizantes.

-Cationes (Hidratación): El extremo positivo atrae moléculas de agua a través de su extremo negativo para lograr un equilibrio eléctrico interno.

Intercambio Catiónico: Los cationes de estabilizantes como la cal reemplazan a los cationes menos deseables en la estructura de la arcilla, mejorando sus propiedades.

Floculación y Agregación: Los cationes promueven la floculación y agregación de las partículas de arcilla, reduciendo la plasticidad y expansividad del suelo.

Reacciones Pozzolánicas: Los cationes facilitan la formación de compuestos cementantes estables que aumentan la resistencia del suelo.

Reducción de la Expansividad: La sustitución de cationes expansivos por cationes estables reduce la capacidad del suelo para expandirse.

2.3.3 Problemas relacionados

La expansión del suelo puede causar una variedad de problemas en la construcción y la infraestructura. Algunos de los problemas asociados con la expansión del suelo incluyen:

Deformaciones y asentamientos: el hinchamiento y la contracción puede provocar deformaciones en las estructuras construidas sobre él, dando lugar a distintos asentamientos. Esto puede causar grietas en paredes, pisos y cimientos, poniendo en peligro la estabilidad estructural y la durabilidad.

Daños en las estructuras: La expansión del suelo puede ejercer presión sobre los elementos estructurales, provocando fisuras, agrietamientos e incluso derrumbes parciales o totales de las estructuras. Los daños pueden necesitar reparaciones costosas y poner en peligro la seguridad de quienes ocupan los edificios.

Inestabilidad de las fundaciones: la expansión del suelo podría poner en peligro la estabilidad de los cimientos porque los cambios volumétricos pueden afectar la capacidad de carga y la capacidad de los cimientos, afectando en un desplazamiento estructural o hundimiento.

Problemas de drenaje: el suelo expansivo puede tener baja permeabilidad, lo que dificulta el drenaje adecuado de agua, conduciéndola a la acumulación de esta y la presión hidrostática en el suelo, los cuales no solo ayuda a incrementar estos ciclos de expansión y contracción, sino que también puede contribuir a la erosión y la pérdida de la capacidad portante del suelo

Costos adicionales en la construcción: La presencia de suelos en expansión agrega nuevos desafíos a la construcción, lo que requiere medidas de estabilización y precauciones adicionales.

la construcción en suelos expansivos implica costos adicionales significativos en diversas etapas del proyecto, desde la investigación y diseño hasta la construcción y el mantenimiento. Estos costos reflejan la necesidad de abordar los riesgos y desafíos específicos que presentan los suelos expansivos para asegurar la durabilidad y estabilidad de las infraestructuras construidas sobre ellos.

2.3.4 Recomendaciones de construcción

Es importante seguir ciertas recomendaciones al construir en áreas expansivas para evitar problemas, de estas recomendaciones incluyen realizar estudios geotécnicos para comprender mejor el suelo, diseñar estructuras apropiadas para adaptarse a los cambios del suelo, estabilizar el suelo con técnicas apropiadas, controlar la humedad, implementando sistemas de drenaje eficientes, monitoreando continuamente y consultando con especialistas. Las medidas aseguran la estabilidad y durabilidad de las construcciones en suelos en expansión. Es fundamental adaptar estas recomendaciones a las características únicas de cada proyecto.

Una de las técnicas más relevantes para manejar suelos expansivos es la estabilización química. Esta práctica se basa en la utilización de aditivos químicos que interactúan con las partículas del suelo para reducir su tendencia a expandirse. Estos aditivos, como el cemento, la cal o las cenizas volantes, se mezclan con el suelo para fortalecer su cohesión y capacidad de soporte, disminuyendo así su susceptibilidad a cambios volumétricos significativos debido a la humedad. La estabilización química es altamente efectiva para mitigar los problemas asociados con los suelos expansivos y proporciona una solución duradera y económicamente viable para proyectos de construcción en áreas donde estos suelos son comunes(Zada et al., 2023).

No obstante, es importante destacar que la elección de la técnica más adecuada para controlar los suelos expansivos dependerá de las características específicas del suelo.

2.4 Arcillas

La arcilla es un tipo de suelo o material sedimentario originado por la descomposición de minerales en rocas, especialmente aquellos ricos en aluminio y silicio. A nivel molecular, la arcilla está mayormente compuesta por minerales como la caolinita, montmorillonita e illita, que tienen una estructura en láminas formadas por tetraedros y octaedros. Estas láminas retienen agua, lo que contribuye a las propiedades plásticas y cohesivas de la arcilla.

Según (Braja,2015), las partículas con un diámetro inferior a 0.002 mm, e incluso aquellas con un diámetro entre 0.002 y 0.005 mm, se clasifican como partículas "de tamaño arcilla". A diferencia de las partículas de arcilla, estas no siempre exhiben plasticidad al interactuar con el agua.

La arcilla tiene la capacidad de retener agua entre sus partículas, lo que le confiere plasticidad y la capacidad de cambiar de forma al mojarse. Además, puede contener otros minerales como óxidos de hierro, cuarzo y feldespato, que influyen en su color y propiedades físicas. Poseen una estructura laminar, lo que les otorga una superficie muy amplia y una alta capacidad de intercambio catiónico. Las arcillas tienen una alta plasticidad, es decir, pueden moldearse fácilmente cuando están húmedas. Esto se debe a la capacidad de sus partículas para deslizarse unas sobre otras. Muchas arcillas son expansivas, lo que significa que pueden aumentar de volumen significativamente al

absorber agua y reducirse al perderla. Esto se debe a su capacidad para atraer y retener moléculas de agua en su estructura. Tienen la capacidad de intercambiar cationes entre sus superficies y la solución del suelo, lo que afecta sus propiedades químicas y físicas. Esta característica es crucial para su comportamiento en el suelo y su interacción con estabilizantes(Kanagarathinam et al., 2021).

(Das,2015) presenta una categorización de los tipos de granos en el suelo basada en el tamaño de las partículas, según se describe en la ilustración 5.

Ilustración 5

Límites de tamaño de suelos de (Das,2015)

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas) < 0.075	

Nota. De Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Cuata edición (p.234),por Braja M

Das,2015,Cengaje Learning.

2.4.1 Propiedades de la arcilla

Plasticidad: La arcilla muestra plasticidad, lo que implica su capacidad para cambiar de forma y conservar esa nueva forma cuando se somete a fuerzas de deformación.

Cohesión: La arcilla tiende a ser cohesiva, es decir, las partículas tienen una fuerte afinidad entre sí. Esto contribuye a su capacidad para retener agua y formar masas coherentes.

Retención de Agua: La arcilla tiene la capacidad de retener agua entre sus partículas, lo que la hace útil para mantener la humedad en el suelo.

Contracción y Expansión: La arcilla puede contraerse o expandirse en respuesta a cambios en el contenido de agua. La contracción puede dar lugar a grietas en el suelo, especialmente en condiciones secas, mientras que la expansión puede generar problemas en la construcción.

Color: El color de la arcilla varía según la presencia de minerales, especialmente óxidos de hierro. Puede abarcar desde tonos blancos y grises hasta colores más cálidos como rojo y amarillo.

2.4.2 La identificación en campo de suelos arcillosos

Por lo general, la evaluación de suelos arcillosos se lleva a cabo mediante observaciones visuales y pruebas sencillas destinadas a determinar sus características físicas. Aquí se describen algunas de estas técnicas:

Color: Se realiza una observación del color del suelo. Aunque los suelos arcillosos pueden tener variaciones, suelen exhibir tonalidades como marrón oscuro, gris o rojo debido a la presencia de minerales como los óxidos de hierro. Además, es común que se oscurezcan cuando están húmedos y se aclaren al secarse.

Textura y Consistencia: Al tomar una muestra de suelo y palpar su textura, los suelos arcillosos suelen sentirse suaves y pegajosos cuando están húmedos.

Formación de Pelotas: Se intenta formar una bola con el suelo húmedo en las manos. Los suelos arcillosos tienden a formar bolas fácilmente y pueden ser moldeados con facilidad.

Plasticidad: Se lleva a cabo la prueba de plasticidad al tomar una pequeña porción de suelo húmedo y tratar de formar un hilo delgado. Los suelos arcillosos, por lo general, exhiben alta plasticidad y pueden formar hilos de longitud considerable.

Contracción al Secar: Se observa si hay grietas en el suelo al secarse. Los suelos arcillosos suelen experimentar contracción y desarrollar grietas durante este proceso.

Presencia de Estrías de Deslizamiento: Se examina la presencia de estrías de deslizamiento en taludes o cortes. Los suelos arcillosos, especialmente cuando están saturados, son propensos a deslizamientos y deformaciones.

Análisis Visual de Perfiles de Suelo: Los cambios climatológicos en la zona influirán directamente, ya que durante invierno y verano se pueden observar grietas en el suelo debido a las variaciones de humedad. Los suelos que exhiben fisuras en múltiples

direcciones suelen estar compuestos por arcillas. Se examinan los perfiles de suelo en el área, prestando atención a la presencia de horizontes arcillosos como los horizontes Bt (arcilla de subsuelo).

Prueba del Rollo: Se realiza la prueba del rollo para evaluar la plasticidad, enrollando una porción de suelo entre los dedos para formar un cilindro. Los suelos arcillosos tienden a formar cilindros largos y delgados durante esta prueba.

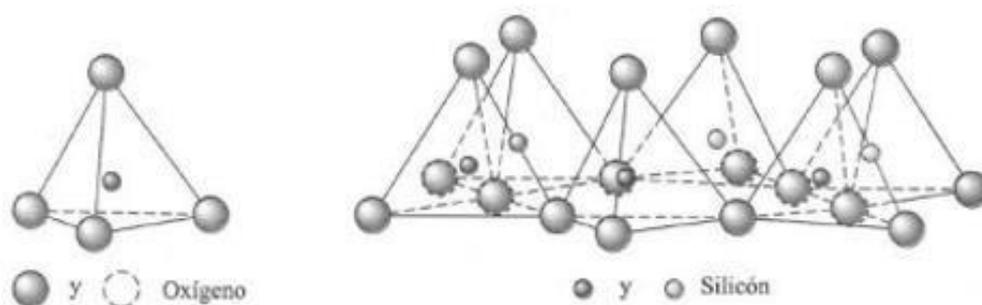
2.4.3 Minerales arcillosos

Los minerales arcillosos están compuestos principalmente por silicatos de aluminio hidratados y a menudo contienen elementos adicionales como hierro, magnesio, potasio, sodio y calcio. Estos minerales se caracterizan por su estructura laminar, que consiste en capas de tetraedros de sílice y octaedros de alúmina. La estructura laminar permite que estos minerales adsorban agua y cationes entre sus capas, confiriéndoles propiedades únicas (Malathi et al., 2021).

Los minerales arcillosos se forman principalmente a través de procesos de meteorización química y alteración hidrotermal de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Estos procesos descomponen los minerales primarios presentes en las rocas, liberando iones que posteriormente se recombinan para formar minerales secundarios, como las arcillas, como se muestra en la ilustración 6. Además, los tres átomos de oxígeno en la base son compartidos por tetraedros adyacentes (Das, 2015).

Ilustración 6

Tetraedro de sílice y Lamina de sílice.



Nota. De Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Cuarta edición (p.268),por Braja M

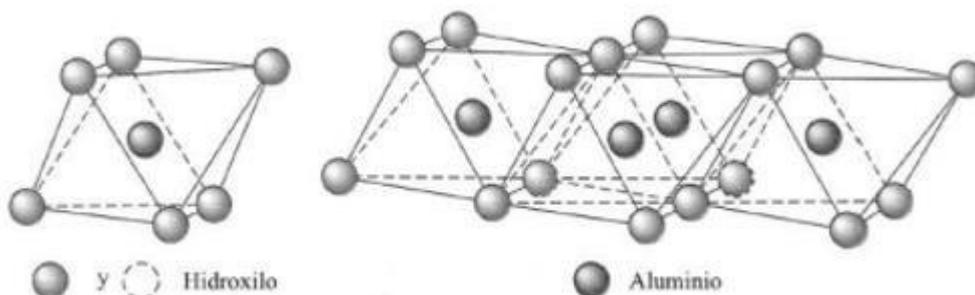
Das,2015,Cengage Learning.

Al contrario, las unidades octaédricas están compuestas por seis grupos de hidroxilos dispuestos alrededor de un átomo de aluminio. La agrupación de múltiples de estas

unidades octaédricas da lugar a una lámina compuesta por octaedros de hidroxilos de aluminio, tal como se representa en la Ilustración 7. Este tipo de lámina también es conocido como lámina octaédrica (Shah et al., 2023)

Ilustración 7

Octaedro de alúmina y lamina octaédrica.



Nota. De Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Cuarta edición (p.270),por Braja M Das,2015,Cengaje Learning.

Los minerales arcillosos pueden ser clasificados en cinco grupos principales:

Caolinita:La caolinita es uno de los minerales arcillosos más comunes. Su estructura laminar la convierte en el componente principal del caolín, empleado en la fabricación de cerámica y como carga en papel y pinturas.

Montmorillonita: La montmorillonita es otro mineral arcilloso significativo. Su estructura permite una expansión notable al saturarse con agua, lo que la hace valiosa en aplicaciones de impermeabilización y en la formación de lodos de perforación en la industria petrolera.

Illita:La illita pertenece al grupo de minerales arcillosos con propiedades similares a las de la moscovita (una mica). Es común en suelos y sedimentos, influyendo en la retención de agua y la expansión-contracción del suelo.

Esmectita:La esmectita es un conjunto de minerales arcillosos que incluye a la montmorillonita. Su capacidad única de expansión y contracción la hace valiosa en aplicaciones geotécnicas y como absorbente en diversas industrias.

Clorita: Aunque la clorita no se clasifica típicamente como un mineral arcilloso, comparte propiedades similares y puede coexistir con otros minerales arcillosos en

algunos suelos. Perteneciente al grupo de las micas, puede contribuir a las características físicas del suelo.

2.4.4 Estabilización de arcillas expansivas

La estabilización de arcillas expansivas se define como el proceso geotécnico mediante el cual se mejoran las propiedades físicas y mecánicas de las arcillas que experimentan cambios de volumen significativos debido a variaciones en el contenido de humedad. En líneas generales, implica mejorar sus cualidades mediante la combinación de diversos aditivos. El objetivo principal de este proceso es fortalecer la capacidad de carga del suelo, hacerlo resistente a los cambios de volumen, mejorar el peso unitario seco, y así reforzar superficies como las carreteras y otras aplicaciones geotécnicas (Sudheer Kumar & Janewoo, 2016).

No todos los suelos tienen la capacidad adecuada para soportar las cargas que diferentes estructuras les imponen. Es crucial evitar suelos que sean débiles, sueltos, expansivos o que tengan un nivel freático cercano a la superficie. En su lugar, se buscan áreas con buena capacidad de carga y estabilidad volumétrica. Por lo tanto, es fundamental evaluar las características del suelo para determinar si se necesita algún tratamiento para mejorarlo. (Vikas & Ramana, 2023).

Según (Fratelli, 1993), para estabilizar un suelo se deben aplicar procesos que alteren sus propiedades originales, lo que resulta en una mejora en su comportamiento en términos de resistencia, características mecánicas, estabilidad volumétrica, capacidad de drenaje, entre otros aspectos. La alternativa de estabilización depende de las características específicas del suelo y de las propiedades que se deseen mejorar en cada caso.

2.4.5 Alternativas de estabilización

Existen diversas opciones para estabilizar suelos, y la selección de cada una depende de las propiedades iniciales del material y de los objetivos de mejora que se busquen. El propósito es convertir el suelo en un material con propiedades mecánicas estables que cumplan con los requisitos del proyecto. Este proceso se lleva a cabo mediante métodos aplicados directamente en el sitio o mediante la elaboración de rellenos artificiales. Algunos de los métodos más frecuentemente empleados incluyen:

-Métodos físicos:

Mezcla de suelos: Consiste en combinar dos o más suelos con propiedades complementarias para obtener un material de mayor calidad, generalmente mejorando la plasticidad y granulometría. A menudo, se combina con la compactación del suelo para lograr los efectos deseados.

Uso de Geotextiles: Estos materiales no biodegradables y permeables se emplean como filtros para gestionar la erosión del suelo y el transporte de sedimentos.

-Métodos mecánicos:

Este enfoque implica el uso de maquinaria para mejorar las condiciones iniciales del suelo sin generar reacciones químicas significativas. Algunos métodos comunes incluyen:

Compactación: consiste en aplicar energía mecánica al suelo en capas delgadas para aumentar su densidad y reducir su volumen de vacíos. Este proceso se realiza mediante equipos como rodillos lisos, rodillos vibratorios, rodillos de pata de cabra y compactadores de placa, aumentando así la resistencia al corte y reduciendo la compresibilidad y permeabilidad.

Refuerzo del Suelo: Se refiere al uso de elementos estructurales o geosintéticos para aumentar la capacidad de carga, mejorar la estabilidad y reducir la deformabilidad del suelo, haciéndolo más adecuado para soportar cargas estructurales, como ejemplo tenemos a georedes, geoceldas, pilotes, muros de contención, entre otros.

-Métodos Químicos:

Estabilización con cal: Utilizado en suelos arcillosos para reducir plasticidad y potencial de hinchamiento.

Estabilización con cemento Portland: Empleado principalmente en suelos arenosos para aumentar la resistencia.

Estabilización con productos asfálticos: Aplicado en material triturado sin cohesión para mejorar la estabilidad.

Estabilización con Cloruros: ayuda a aumentar la densidad y la resistencia del suelo al promover la floculación de partículas finas y la reducción del volumen de vacíos.

Estabilización con polímeros: pueden ser naturales o sintéticos, se mezclan con el suelo y actúan como agentes aglutinantes, formando una matriz sólida que une las partículas del suelo. Este proceso reduce la expansibilidad y la permeabilidad del suelo, incrementa su resistencia al corte y mejora su capacidad de carga

Es crucial tomar en cuenta los siguientes puntos para tener una estabilización correcta:

Dosificación Precisa: Es importante determinar la dosificación correcta de productos químicos para evitar efectos adversos como la expansión excesiva o la pérdida de resistencia.

Compatibilidad: Asegurar la compatibilidad de los estabilizantes con el suelo y otros materiales presentes en el proyecto.

Impacto Ambiental: Evaluar el impacto ambiental de los productos químicos utilizados y adoptar medidas adecuadas de mitigación.

3. MATERIALES Y METODOS

Con el objetivo de analizar y comprender las características expansivas de los suelos en estudio, se ha dividido la metodología en dos aspectos fundamentales: la realización de ensayos para caracterizar el suelo, y encontrar un método eficiente para la estabilización de este. A continuación, proporcionamos una breve descripción de los ensayos, su procedimiento de cálculo y las normativas utilizadas para cada uno de ellos en ambas partes de la metodología.

El objetivo de este proyecto es caracterizar los diferentes suelos para encontrar los problemas de expansividad de las zonas y posterior a eso trabajar en la estabilización con el suelo más desfavorable.

3.1 Caracterización del suelo

La caracterización de suelos es el proceso de estudiar y comprender un suelo en particular. Esto implica realizar análisis y ensayos para obtener información sobre sus propiedades físicas y químicas. Estos datos son importantes para comprender cómo el suelo se comporta y cómo afecta a las estructuras construidas sobre él (Osman, 2018).

Durante la caracterización de suelos, se toman muestras del suelo y se realizan pruebas en el laboratorio para medir su densidad, tamaño de partículas, capacidad de retener agua, resistencia y otros aspectos relevantes. Esta información ayuda a los ingenieros y profesionales de la construcción a tomar decisiones informadas sobre cómo diseñar y construir de manera segura y eficiente en ese tipo de suelo.

Lo que permite prever posibles problemas y tomar medidas adecuadas para evitar daños en las estructuras. También ayuda a determinar qué tipo de cimentación o métodos de construcción son más adecuados para ese suelo en particular.

Conocer las características del suelo es fundamental. Esto requiere determinar la distribución de los diferentes tamaños de partículas que lo componen y otras propiedades físicas relevantes. Para analizar la granulometría, se separan las partículas por tamizado para las más grandes y por sedimentación con hidrómetro para las más pequeñas. Utilizando los porcentajes obtenidos y los resultados de los límites de Atterberg, se clasifica el suelo según los sistemas SUCS o AASHTO. Esto permite identificar el tipo de suelo y establecer una relación con los posibles resultados de los ensayos de expansibilidad.

3.1.1 Granulometría

La distribución granulométrica hace referencia a la relación entre partículas de diversos tamaños que conforman una muestra de suelo, ofreciendo detalles acerca de la textura del suelo, como la proporción de arena, limo y arcilla. Estos análisis se ejecutan

mediante técnicas de tamizado o hidrómetro, y en esta explicación se detalla su procedimiento y ejecución.

Para caracterizar los agregados utilizados en este estudio, se siguió los pasos establecidos por la norma NTE INEN 0696, donde se determina la distribución granulométrica de los agregados mediante el uso de una serie de tamices estándar. Este método también concuerda con las normas ASTM C136 y la AASHTO T 27.

Proceso:

- Previamente, se utiliza una muestra desintegrada de suelo
- Para cada experimento, se pesa una muestra de 500 gramos y se lava en un tamiz de 200.
- La tierra recolectada se coloca en un horno a una temperatura precisa de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, con el fin de extraer la humedad que contiene la muestra y obtener una muestra seca.
- Tamizado: La muestra seca se coloca sobre una serie de tamices con distintas aberturas de malla. El tamizado puede ser realizado de manera manual o mediante el uso de una tamizadora mecánica. El tiempo de tamizado no se fija estrictamente, pero debe ser suficiente para lograr una separación completa de las partículas.

En este caso, se utiliza el método de tamizado manual, que requiere agitar vigorosamente cada tamiz con movimientos rotatorios y de golpeo. El proceso de tamizado continúa hasta que solo el 1% del peso del material se mueve a través de cada malla durante un minuto adicional.

Esta técnica permite construir la curva granulométrica de suelos con partículas mayores a 0.075 mm o retenidas en la malla N°200. Se hace pasar una muestra de suelo a través de un conjunto de mallas, comenzando por la de mayor abertura hasta llegar a la de menor.

Los resultados se presentan indicando el tamaño de las partículas retenidas en cada malla, usando números o símbolos que representen la fracción del suelo donde se retuvo la mayor cantidad. Este ensayo se realiza siguiendo las directrices establecidas en la normativa ASTM C-136.

Los resultados se grafican en una curva granulométrica, donde el eje horizontal refleja los tamaños de partículas y el eje vertical muestra los porcentajes acumulativos.

- Luego de completar el tamizado, se mide y registra el peso del material retenido en cada malla. También se anota el peso total de la muestra original. Usando esos datos, se calcula el porcentaje de suelo que quedó retenido en cada una de las mallas.
- Con la información recopilada, se procede a trazar la curva granulométrica. Esta representa el porcentaje acumulado de suelo retenido a lo largo de los diferentes

tamaños de partículas. Este gráfico es clave para visualizar cómo se distribuyen las distintas fracciones de tamaño en la muestra de suelo.

3.1.2 Hidrómetro

Para caracterizar las partículas finas en los suelos estudiados, se utilizó el método del hidrómetro siguiendo la norma ASTM D422, que permite determinar la distribución granulométrica de partículas menores a 75 μm .

Se utiliza una muestra de 50 g que ha pasado por un tamiz de tamaño 200 para realizar este ensayo. Para evitar que las partículas del suelo interfieran en los resultados, se añade una solución al 4% de hexametáfosfato de sodio, que actúa como defloculante. Después de dejar que la solución repose con el suelo durante 8 a 12 horas, se mezcla durante 2 minutos.

Una vez que ha transcurrido el tiempo de reposo, se coloca un hidrómetro graduado en la suspensión. El hidrómetro es un instrumento que flota en el líquido y permite medir la densidad del agua-suelo en función de la cantidad de partículas finas presentes.

Se coloca la combinación de suelo y agente dispersante en una probeta graduada de 1000 ml, y se completa con agua destilada hasta llegar al nivel de 1000 ml.. Se agita la exposición y se toman medidas con un hidrómetro a intervalos de tiempo específicos, como 0,25, 0,5, 1 y 2 minutos. Luego Se coloca el hidrómetro en otra probeta graduada de 1000 ml llena sólo con agua destilada, y se procede a medir en intervalos de tiempo adicionales.

Las lecturas del hidrómetro se corrigen para la temperatura del líquido y la densidad del dispersante, estas lecturas se utilizan para calcular la densidad de la suspensión a diferentes momentos de sedimentación.

Usando las lecturas ajustadas y el tiempo empleado, La ley de Stokes permite calcular el tamaño de las partículas en suspensión, relacionando la velocidad a la que estas se hunden con sus dimensiones. Esta fórmula matemática posibilita determinar las características de las pequeñas partículas suspendidas en un fluido.

Con los valores de densidad recopilados, se estima el porcentaje de partículas pequeñas presentes en cada intervalo de tiempo. Posteriormente, se genera una curva de sedimentación que ilustra cómo están distribuidas las partículas finas dentro de la muestra de suelo.

3.1.3 Clasificación del suelo

La clasificación de suelos en un ensayo de expansividad consiste en categorizar el suelo según su capacidad para experimentar cambios volumétricos significativos debido a minerales expansivos, como las arcillas. Durante el ensayo, se somete una muestra de suelo a ciclos controlados de humedecimiento y secado, registrando las variaciones de volumen. La clasificación puede variar según los criterios establecidos en la normativa

o estándares geotécnicos utilizados. Se utilizan categorías como no expansivo, ligeramente expansivo, moderadamente expansivo y altamente expansivo. La clasificación ayuda a comprender el comportamiento del suelo expansivo y a tomar medidas adecuadas para mitigar los problemas asociados, como la estabilización del suelo o el diseño de cimentaciones adecuadas. Es importante contar con profesionales geotécnicos para realizar una clasificación precisa y apropiada, considerando la normativa y el contexto del proyecto.

Se pueden utilizar dos metodologías aceptadas para la clasificación de suelo: una es la metodología de la AASHTO y la otra es el Sistema Unificado de Suelos (SUCS). Ambas metodologías son ampliamente reconocidas y se describirán a continuación.

3.1.3.1 AASHTO

Es un procedimiento estandarizado utilizado para categorizar y caracterizar los suelos con fines de ingeniería civil y diseño de carreteras. Este método se basa en la evaluación de las propiedades físicas y granulométricas del suelo, proporcionando una estructura sistemática para clasificarlos en grupos que reflejen sus comportamientos bajo diferentes condiciones de carga y ambiente.

La clasificación según AASHTO considera varios parámetros clave, incluyendo el tamaño de las partículas (grava, arena, limo y arcilla), la distribución del tamaño de partículas, la plasticidad y la densidad relativa del suelo. Estos parámetros se determinan mediante ensayos de laboratorio específicos como el análisis granulométrico, límites de Atterberg y ensayos de compactación Proctor.

Para llevar a cabo la clasificación, se utilizan tablas y gráficos proporcionados por AASHTO que permiten asignar un grupo de clasificación a cada tipo de suelo en función de sus propiedades. Estos grupos van desde A-1 hasta A-7, donde los suelos de menor a mayor capacidad de soporte y estabilidad se encuentran en los grupos A-1, A-2 y A-3, mientras que los suelos más finos y menos estables están en los grupos A-4 a A-7.

3.1.3.2 SUCS

Se utiliza para clasificar los suelos según sus características físicas y granulométricas. Este método utiliza una combinación de símbolos y letras para detallar las propiedades del suelo.

En el SUCS, se toman en cuenta dos aspectos fundamentales: el porte de las partículas y la plasticidad del suelo. El tamaño de las partículas se divide en tres grupos principales: grava, arena y arcilla. Además, se utilizan letras para indicar la cantidad de cada componente presente en el suelo, como G para grava, S para arena y M para limo.

La plasticidad hace referencia a la capacidad del suelo de cambiar de forma bajo presión y se representa con símbolos como "L" para baja plasticidad, "H" para alta plasticidad y "P" para suelos inorgánicos con plasticidad intermedia.

Esta combinación de símbolos y letras permite clasificar los suelos según su composición y comportamiento geotécnico. El SUCS es una forma estandarizada y ampliamente utilizada para describir y comunicar las propiedades de los suelos en proyectos de ingeniería civil y geotecnia.

3.2 Expansividad

3.2.1 Límites de Atterberg

Las características específicas del suelo que determinan cómo se comporta en función de su contenido de agua. También conocidos como límites de plasticidad, estos datos se emplean para clasificar los materiales y entender su plasticidad, cohesión y variación de volumen.

Límite Líquido

Aplicamos la norma ecuatoriana NTE INEN 0691, equivalente a la ASTM D 4318 y la AASHTO T 89, para medir el límite líquido del suelo. Este límite indica el punto en el que el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido, y se expresa como un porcentaje. Este dato es crucial para entender la plasticidad y fluidez del material.

En el procedimiento, se utiliza suelo que ha pasado por un tamiz N40 y se le agrega agua destilada hasta obtener una pasta homogénea. Luego, se coloca una muestra de esta pasta en la copa de Casagrande y se hace una ranura en el centro. Se golpea la copa a una frecuencia de 2 golpes por segundo hasta que la ranura se cierre a 12 mm después de 25 golpes. Finalmente, se grafica la humedad en escala logarítmica versus el número de golpes, y la humedad correspondiente a 25 golpes se determina como el límite líquido.

Límite plástico

Utilizamos norma ecuatoriana NTE INEN 0692, equivalente a la norma AASHTO T-90 y a la ASTM D 4318.

El límite plástico (PL) es el contenido de humedad a partir del cual un suelo atraviesa de un estado semisólido a un estado plástico. En este estado, el suelo tiene suficiente humedad para deformarse sin romperse, pero no tanta como para comportarse como un líquido. Es un parámetro crucial en la clasificación de suelos y en la evaluación de sus propiedades de consistencia y plasticidad.

El límite plástico ayuda a determinar la plasticidad del suelo, que es una medida de la capacidad del suelo para deformarse sin fracturarse.

Lo primero es triturar y tamizar el suelo con una malla N°40, similar al inicio del ensayo para el límite líquido. Segundo, se agrega agua al material que pasa a través de la malla, mezclándolo hasta obtener una pasta suave y uniforme que no se adhiere a las manos pero que se puede moldear fácilmente. Después, se forma un cilindro de suelo utilizando la palma de la mano sobre una superficie de vidrio, asegurándose de que alcance un diámetro de 3 mm. Si no se observan grietas al llegar a este diámetro, significa que el contenido de humedad es excesivo, por lo que se debe amasar la muestra para reducir la humedad y luego volver a formar el cilindro. En caso de que aparezcan grietas antes de alcanzar los 3 mm de diámetro, esto indica que el contenido de humedad es insuficiente. es necesario preparar una nueva muestra añadiendo más agua. El ensayo concluye cuando los cilindros presentan fisuras al llegar a los 3 mm de diámetro.

El contenido de humedad en porcentaje define el límite plástico, el cual se calcula pesando la muestra antes y después de secarla en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que su peso se mantenga constante. La fórmula para calcular el contenido de humedad es la siguiente:

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso de la muestra seca}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1.})$$

La diferencia entre el peso de la muestra cuando está húmeda y cuando está completamente seca representa el contenido de agua en la muestra. El peso de la muestra seca se obtiene después de secarla en el horno, y este valor se asocia con el límite plástico, ya que la muestra se deshace al rodarla hasta un diámetro de 3 mm.

Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) es una medida que ayuda a determinar la capacidad de un suelo para deformarse sin romperse. Se obtiene restando el límite plástico (PL) del límite líquido (LL) del suelo. Este indicador proporciona información sobre el rango de humedad en el que el suelo presenta sus características plásticas distintivas. Es esencial para clasificar los suelos y evaluar su comportamiento en diversas aplicaciones geotécnicas. Un IP elevado sugiere que el suelo es muy plástico y cohesivo, mientras que un IP bajo indica que el suelo tiene menor plasticidad y cohesión.

$$IP = LL - PL \quad (\text{Ecuación 2.})$$

Estos parámetros son fundamentales para categorizar el suelo conforme a sistemas como el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y ofrecen información crucial para el diseño de cimentaciones, la estabilidad de taludes y otros aspectos relevantes de la ingeniería civil.

ENSAYOS DE EXPANSION

Los ensayos se centran en la medición de la variación de volumen que sufre el suelo al absorber agua sin estar sometido a una carga que restrinja esta variación volumétrica. Este cambio se registra a lo largo del tiempo para obtener una representación gráfica de la expansión del suelo. Además, se evalúa la presión que debe aplicarse sobre la muestra saturada para evitar cualquier variación en su volumen. Ambos ensayos, realizados conforme a la norma ASTM D-4829, permiten determinar el potencial expansivo del suelo a través de la expansión libre y la presión de expansión.

3.2.2 Expansión Libre

El ensayo de expansión libre se usa para analizar la capacidad expansiva de un suelo cuando se satura con agua, determinando el porcentaje que representa la variación de altura entre el estado inicial y final del suelo respecto a su altura inicial.

Para realizar el ensayo, la muestra de suelo debe ser representativa del lugar y se recoge sin alterar su estructura natural. Se compacta hasta obtener superficies planas en ambas caras para evitar discrepancias que puedan afectar la precisión de los datos recogidos. Las muestras se dimensionan y pesan para obtener su densidad, además de medir la humedad inicial de la muestra.

-La muestra de suelo se coloca con cuidado dentro de la cámara de consolidación, asegurándose de que las piedras porosas estén bien posicionadas.

-Se anota el peso del anillo y se miden su altura y diámetro.

-La cámara de consolidación se instala en el consolidómetro, confirmando que el brazo de carga esté perfectamente nivelado.

-Se agrega agua hasta que este rebose por encima de la piedra porosa superior, permitiendo que el suelo se sature libremente sin restricciones de volumen.

-Se encera el dial del consolidómetro y se espera hasta que comience a marcar los cambios de volumen en el suelo.

-Se mide el cambio en volumen o altura de la muestra en intervalos de tiempo específicos, generalmente hasta que se alcanza la expansión máxima

- Concluir el ensayo cuando el deformímetro no presente cambios mayores a ± 0.01 (1 raya) en un lapso de 6 horas.

-La expansión libre se calcula como el porcentaje de cambio en volumen o altura respecto al estado inicial:

$$\text{Expansión Libre (\%)} = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3.})$$

ΔH es el cambio en la altura de la muestra (expansión en milímetros).

H_i es la altura inicial de la muestra (en milímetros).

Un mayor porcentaje de expansión indica un mayor potencial expansivo del suelo, Los resultados ayudan a clasificar los suelos en función de su capacidad de hinchamiento

3.2.3 Expansión controlada

El ensayo de expansión controlada se utiliza para evaluar la capacidad de expansión de un suelo bajo condiciones de carga controlada, lo cual es esencial para el diseño y la construcción de estructuras. Este método determina la fuerza necesaria, aplicada en el consolidómetro, para mantener estable un suelo saturado y evitar cambios volumétricos significativos.

El procedimiento inicial es similar al del ensayo de expansión libre. A medida que el deformímetro registra incrementos, se añaden pesos para mantener la estabilidad; si disminuye, se retiran pesos. El dial del deformímetro debe mantenerse dentro del rango de $-0.03 \leq \delta \leq 0.03$ (mm) sin exceder estos valores.

Las mediciones del deformímetro se anotan junto con el tiempo y la carga que se ha aplicado. La prueba termina cuando el deformímetro no presenta cambios de más de ± 0.01 por un periodo de 6 horas. Después, se extraen muestras del suelo para conocer su nivel de humedad y se elabora una gráfica de esfuerzos versus tiempo basada en los resultados obtenidos.

La presión de expansión se calcula utilizando la siguiente formula:

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 4.})$$

P: presión de expansión.

F: Fuerza medida durante el ensayo, aplicada por el dispositivo de carga para evitar la expansión.

A: área de la sección transversal de la muestra de suelo.

3.3 Correlaciones

Las correlaciones son herramientas que permiten establecer relaciones entre distintas propiedades del suelo y los valores que indican su nivel de expansividad. Vélez (2012) las correlaciones se dividen en tres categorías:

1. Aquellas que identifican el mineral predominante en la arcilla.
2. Las que califican cualitativamente el nivel de expansividad del suelo, categorizándolo como bajo, medio, alto o muy alto.
3. Las que cuantifican el porcentaje de expansión y la presión de expansión mediante correlaciones empíricas.

3.4 Compactación Proctor modificado

La norma AASHTO T180-70 se utiliza para establecer la relación entre el contenido de agua y la densidad seca de un suelo compactado. Su propósito principal es identificar la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo que permiten la mayor compactación del suelo.

Contenido de Humedad Óptimo: El nivel de humedad en el cual el suelo alcanza su densidad seca máxima. Este valor es específico para cada tipo de suelo.

Densidad Seca Máxima: La densidad más alta que se puede lograr para un suelo específico cuando se compacta al contenido de humedad óptimo.

En este ensayo, La muestra de suelo debe ser representativa del sitio de estudio y estar libre de materiales grandes o no representativos, se usa un tamiz de 4.75 mm (malla No. 4) para remover partículas grandes. Se divide en submuestras con diferentes contenidos de humedad. Cada submuestra se compacta en un molde cilíndrico utilizando un martillo de 4.54 kg que cae desde una altura de 457 mm. La compactación se realiza en cinco capas, aplicando 25 golpes por capa. Se calculan la densidad seca y el contenido de humedad de cada submuestra.

La densidad seca (ρ_d) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (\text{Ecuación 5.})$$

M_s es la masa seca de la muestra (determinada secando una submuestra en un horno).

V es el volumen de la muestra compactada

Contenido de Humedad: Se calcula el contenido de humedad (w) de la muestra para cada submuestra compactada.

Los valores de densidad seca y contenido de humedad se representan gráficamente para cada submuestra. El punto más alto de la curva de compactación indica la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo.

3.5 Relación de soporte de suelo (CBR de laboratorio)

La prueba ASTM D1883-73 proporciona un procedimiento normalizado para evaluar la capacidad de soporte de California (CBR) de suelos y materiales de base en un entorno de laboratorio. Este análisis cuantifica la resistencia a la penetración de suelos compactados.

La muestra de suelo debe ser representativa del sitio de estudio. Debe secarse y tamizarse a través de un tamiz de 4.75 mm (malla No. 4) para eliminar partículas grandes, a continuación, debe ser ajustada al contenido óptimo de humedad, determinado previamente por un ensayo de Proctor.

El siguiente paso es compactar en un molde cilíndrico el material se apila en tres niveles, compactándose cuidadosamente con 56 impactos de un martillo de 10 libras (4.54 kg) que se deja caer desde una altura de 457 milímetros. (18 pulgadas). La superficie de la muestra debe ser nivelada y alisada.

El suelo compactado se satura sumergiéndola en agua durante 96 horas para simular condiciones de campo. Alternativamente, puede realizarse sin saturación según los requisitos del proyecto, en el siguiente paso se realiza la prueba de penetración con un pistón de 49.6 mm (1.95 pulgadas) de diámetro que se empuja en la muestra a una tasa constante de 1.27 mm/min (0.05 pulgadas/min).

Calculo:

Se registra la fuerza necesaria para penetrar la muestra a diferentes profundidades (generalmente 2.5 mm y 5.0 mm). El valor CBR se calcula comparando la fuerza de penetración con la fuerza estándar para un material de referencia (piedra triturada).

$$CBR (\%) = \left(\frac{\text{Carga de prueba}}{\text{Carga estándar}} \right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 6.})$$

Los valores de CBR indican la capacidad de soporte del suelo. Valores más altos indican mayor capacidad de soporte, esencial para el diseño de capas de pavimento. Los resultados del ensayo de CBR ayudan a clasificar y seleccionar materiales adecuados para

la construcción de carreteras y otras infraestructuras.

Compactar la muestra en un molde estándar siguiendo el procedimiento Proctor (normal o modificado) hasta alcanzar el 95% de la densidad máxima Proctor.

Clasificación de la Capacidad de Soporte:

Los valores de CBR se utilizan para clasificar la capacidad de soporte del suelo:

Suelos con $CBR < 5\%$: Baja capacidad de soporte.

Suelos con CBR entre 5% y 20% : Capacidad de soporte media.

Suelos con $CBR > 20\%$: Alta capacidad de soporte.

Factores que Afectan el Ensayo CBR:

Densidad y Compacidad: La densidad de compactación del suelo afecta significativamente los resultados del CBR. Por eso, es común realizar el ensayo al 95% de la densidad máxima Proctor.

Contenido de Humedad: El contenido de humedad del suelo durante la compactación y el ensayo afecta la capacidad de soporte del suelo. Es esencial controlar y registrar la humedad para obtener resultados consistentes.

Condiciones de Saturación: La saturación del suelo antes del ensayo puede influir en los resultados, especialmente en suelos cohesivos que pueden mostrar una disminución en la resistencia con la saturación.

3.6 Procesos para la estabilización del suelo

En términos generales, el acondicionamiento del terreno es una técnica que busca realzar las cualidades del suelo al agregar diversos componentes. El objetivo de este procedimiento es incrementar la resistencia a la carga, reducir la susceptibilidad a cambios de volumen, optimizar su densidad y fortalecer los revestimientos de carreteras y otros usos geotécnicos. A continuación, se explicará a fondo el proceso de acondicionar suelos expansivos, los métodos aplicados y los aditivos o mezclas más comunes.

3.6.1 Mecanismo de expansión del suelo expansivo

Las partículas de arcilla tienen cargas negativas en su superficie debido a la sustitución isomórfica. Esto genera fuerzas electrostáticas entre los cationes intercambiables en el medio líquido arcilla-poro y la superficie negativa de la arcilla. La intensidad de estas fuerzas depende de la química del catión intercambiable. Existe una atracción natural para que los iones opuestos sean atraídos hacia la superficie de las partículas de arcilla, manteniendo la neutralidad dentro del medio líquido arcilla-poro. La cantidad de cationes necesarios para mantener la neutralidad en la superficie de la arcilla está

determinada por la capacidad de intercambio catiónico, lo que da lugar a la formación de una doble capa difusa (Zada et al., 2023).

Esta doble capa separa las partículas y los minerales, provocando un comportamiento de hinchamiento en los minerales de arcilla expandible como la montmorillonita. La doble capa difusa influye en diversas características de ingeniería de los suelos arcillosos, especialmente en la conductividad hidráulica, que disminuye a medida que el espesor de la doble capa difusa aumenta con el tiempo. En el caso de minerales de arcilla expansiva, como la montmorillonita, que tienen una estructura en forma de red, su comportamiento está fuertemente influenciado por su capacidad de intercambio catiónico, las cargas superficiales negativas y las grandes áreas superficiales. Aunque las fuerzas de atracción entre células unitarias vecinas son modestas, su capacidad de expansión es significativa debido a su estructura y características físicas (Suwantara et al., 2019).

3.6.2 Métodos y aditivos comúnmente utilizados para la estabilización

Los métodos utilizados para estabilizar suelos expansivos se dividen en categorías principales: estabilización mecánica y estabilización química. Estos métodos tienen como objetivo mejorar las cualidades del suelo, aumentando su capacidad portante, resistencia al cambio de volumen y mejorando sus propiedades para diversas aplicaciones geotécnicas.

Los métodos de estabilización mecánica buscan reducir las tensiones de hinchamiento y el potencial de expansión del suelo sin alterar su composición química. Algunas técnicas físicas comunes incluyen compactación, pre-humectación, ciclos de humectación-secado, refuerzo con materiales sólidos, entre otros. Estas técnicas tienen ventajas como su aplicación sencilla, menor impacto ambiental y costos de estabilización reducidos, además de servir como alternativas para la gestión de residuos. Sin embargo, pueden tener limitaciones, como tratamientos no uniformes y resultados impredecibles, especialmente en suelos Alterados (Vikas & Ramana, 2023).

Para superar las limitaciones de los métodos mecánicos, que son técnicas de rehabilitación de suelos expansivos donde pretenden reducir el comportamiento indeseable sin modificar la química del suelo.

Por otro lado, existen técnicas de estabilización química. Esta modalidad busca mejorar la estabilidad de los suelos expansivos mediante la adición de aditivos químicos en cantidades específicas. La estabilización química puede disminuir el índice de plasticidad, aumentar el tamaño de las partículas del suelo, reducir el hinchamiento y mejorar la resistencia general del suelo.

(Petry, 1989) subdividió los aditivos químicos en tradicionales (por ejemplo, cemento, cal y cenizas volantes), residuos industriales (por ejemplo, CKD, polvo de mármol y

polvo de horno de cal) y aditivos no tradicionales (por ejemplo, polímeros, sal y enzimas). Sin embargo, numerosos estudios se han centrado en la estabilización química tradicional utilizando aditivos como la cal, el cemento y las cenizas volantes, o combinándolos. Aunque la estabilización de suelos expansivos con mezclas de cemento o cal es efectiva, la excesiva dependencia de estos aditivos conlleva un presupuesto inicial extremadamente alto, especialmente para algunos proyectos, como la estabilización de carreteras, donde se requieren cantidades considerables de aditivos. En consecuencia, durante las últimas décadas, los investigadores se han visto motivados a investigar la viabilidad del uso de estabilizantes de residuos industriales como una alternativa rentable para la mejora de suelos expansivos.

Aunque ambas técnicas de estabilización, químicas y mecánicas son comunes y útiles, las técnicas químicas tienden a ser más prevalentes debido a su eficacia en una mayor variedad de suelos, especialmente en suelos cohesivos. Las técnicas químicas ofrecen mejoras significativas y duraderas en las propiedades del suelo, mientras que las técnicas mecánicas son más adecuadas para suelos granulares y situaciones donde se necesita una solución rápida y económica. La elección entre técnicas químicas y mecánicas depende de las condiciones específicas del proyecto, incluyendo el tipo de suelo, los requisitos de la construcción y las restricciones presupuestarias.

3.6.3 Estabilizantes a usar

Esta tesis se enfoca en estabilizadores de residuos industriales, a causa de que ya existen varias investigaciones y pruebas comprobadas en la estabilización química tradicional, donde han sido ampliamente utilizados a lo largo de los años y aunque son efectivos, tienen varias desventajas significativas.

Su producción genera una alta huella de carbono, contribuyendo al cambio climático. Además, su uso intensivo puede resultar costoso y requiere un manejo cuidadoso para evitar problemas de salud y seguridad. Alternativas más sostenibles y modernas, como los polímeros y enzimas, ofrecen beneficios similares en términos de mejora del suelo, pero con menores impactos ambientales y potenciales ahorros en costos y tiempo de aplicación. Por ello, es fundamental considerar y adoptar estabilizantes más ecológicos y eficientes (Sofwan & Nurdin, 2020).

Se han evaluado críticamente algunos aditivos de residuos industriales y su aplicación para la mejora del suelo. Estos incluyen aditivos como polvo de residuos de Mármol (MWP) y polvo de horno de cemento (CKD). La razón principal para la selección de estos aditivos específicos es su disponibilidad y estado de uso.

Estos aditivos fueron seleccionados en base a su disponibilidad en Ecuador, ya que existen otros aditivos no tradicionales, como la toba volcánica y el aditivo RBI 81, que habrían sido interesantes para el análisis de estabilización. Sin embargo, es muy complicado conseguir este tipo de aditivos en la ubicación de este estudio.

3.6.3.1 Polvo de mármol (MWP)

El polvo de mármol es un subproducto de la industria del mármol, compuesto principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3). Su uso en la estabilización de suelos no solo ayuda a mejorar las propiedades mecánicas del terreno, sino que también contribuye a la gestión de residuos industriales, promoviendo prácticas de construcción más ecológicas. Está compuesto principalmente de carbonato de calcio, con pequeñas cantidades de minerales como dolomita, cuarzo y otros compuestos. Se obtiene a partir del corte y pulido de piedras naturales, siendo una roca metamórfica endurecida que ha experimentado procesos hidrotermales. Su fabricación implica la molienda y corte de la piedra hasta obtener partículas finas y bien trituradas. En lugar de recurrir a soluciones convencionales costosas y ambientalmente problemáticas para mejorar la calidad del suelo, este estudio investiga la eficacia del polvo de mármol como estabilizador para suelos expansivos, teniendo en cuenta sus impactos económicos y ambientales (Zada et al., 2023).

El polvo de mármol, comúnmente desechado en ríos, provoca daños a la vida acuática y ya representa una carga para nuestro entorno natural. Utilizar estos residuos para estabilizar suelos expansivos cercanos se presenta como una excelente opción. Se ha determinado que el Polvo de Mármol (MWP, por sus siglas en inglés) puede ser empleado para prevenir problemas de hinchamiento en el suelo.

El MWP actúa rellorando los poros del suelo y aumentando su densidad. Esto mejora la resistencia y reduce la permeabilidad. En presencia de cal o cemento, el polvo de mármol puede participar en reacciones químicas que resultan en la formación de compuestos cementantes, mejorando aún más la cohesión del suelo. La cantidad de polvo de mármol utilizada en la estabilización del suelo puede variar entre 5% y 20% en peso del suelo, dependiendo de las características del terreno y los objetivos específicos del proyecto (Florez-Gongora et al., 2016).

Ilustración 8

Polvo de Mármol (MWP).



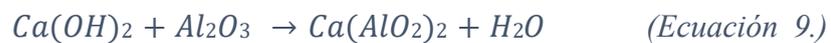
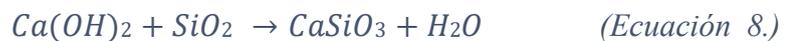
Aunque no es tan reactivo como otros estabilizantes químicos, puede participar en ciertas reacciones químicas que mejoran las propiedades del suelo, especialmente cuando se combina con otros aditivos como la cal o el cemento. Se pueden presentar las posibles reacciones químicas:

Carbonatación: El carbonato de calcio del MWP puede reaccionar con el dióxido de carbono (CO₂) del aire para formar bicarbonato de calcio (Ca(HCO₃)₂) en presencia de agua. Esta reacción es más relevante en ambientes húmedos y ayuda a consolidar la estructura del suelo, aunque es relativamente lenta.

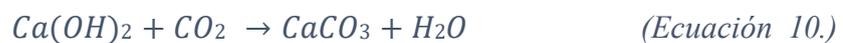


Reacción Pozzolánica

Aunque el MWP en sí no es muy pozzolánico, cuando se mezcla con cal (Ca(OH)₂), puede mejorar las propiedades del suelo al reaccionar con los silicatos y aluminatos presentes en las arcillas del suelo. La formación de silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH) aumenta la cohesión y la resistencia del suelo.



Reacción con Hidróxido de Calcio: El MWP puede neutralizar parte del hidróxido de calcio (cal libre) presente en el suelo o añadido durante el proceso de estabilización. Esta reacción contribuye a la formación de carbonato de calcio adicional, que puede ayudar a estabilizar el suelo.



Reacción de Hidratación del Cemento: Cuando el polvo de mármol se mezcla con cemento, las reacciones de hidratación del cemento pueden beneficiarse de la presencia de MWP. El MWP puede actuar como un filler inerte que mejora la densidad y la estructura del suelo, además de contribuir a la formación de compuestos cementantes en presencia de cal.





3.6.3.2 Polvo de horno de cemento (CKD)

El CKD, un material particulado con apariencia similar al cemento Portland, se genera durante la fabricación del cemento, recogiendo polvo de los gases del horno, que se desecha en vertederos. Utilizándose cada vez más en la estabilización de suelos. Se ha empleado como aditivo para alterar la plasticidad, mejorar la resistencia al cizallamiento y reducir la presión de hinchamiento de suelos expansivos. Recientemente, la CKD, un subproducto de la fabricación de cemento Portland, ha captado la atención de investigadores como un aditivo prometedor, la cual representa aproximadamente el 15-20% de la producción de cemento, planteando desafíos de almacenamiento y siendo considerado una fuente potencial de contaminación. Debido a su contenido de cal libre (CaO), la CKD muestra propiedades cementantes, convirtiéndola en un estabilizador eficaz para ciertos suelos. Dada la presencia significativa de instalaciones de fabricación de cemento, la CKD se considera como una alternativa potencialmente valiosa y rentable a otros estabilizantes del suelo, como la cal, las cenizas volantes y el cemento Portland (Suwantara et al., 2019).

Aunque el uso de CKD en la remediación de suelos expansivos puede abordar problemas introducidos por sus residuos, la investigación global sobre este tema es limitada, a pesar de su importancia económica y ambiental. Estudios indican similitudes entre la CKD y la cal en términos de mecanismo de estabilización, atribuyendo esta similitud a la disponibilidad suficiente de cal libre en la CKD. El mecanismo de estabilización del suelo mediante cal o CKD se clasifica en dos fenómenos: modificación para reducción de plasticidad (tratamiento a corto plazo) y solidificación (tratamiento a largo plazo), involucrando etapas como intercambio catiónico, floculación, aglomeración, reacción puzolánica y carbonatación. Tres de estas etapas se producen a corto plazo (fenómeno de modificación). La última etapa se produce durante el proceso a largo plazo (es decir, fenómeno de solidificación) (Basma, 1996)

La CKD ha demostrado mejoras en la plasticidad del suelo, el potencial de hinchamiento y el coeficiente de soporte de California (CBR). El proceso de tratamiento inicia con la reacción de la cal (o cal libre en CKD) con el agua en el suelo húmedo, denominada hidratación. La hidratación de la cal es una reacción exotérmica que se produce inmediatamente, formando cal hidratada (Ca(OH)_2). La cal hidratada se disuelve en agua, generando iones Ca^{2+} y OH^- . Este proceso de intercambio de cationes y agregación de minerales de arcilla se lleva a cabo durante aproximadamente 3 días, reduciendo las características de plasticidad e hinchamiento del suelo. La floculación y aglomeración de partículas de arcilla resultan en la formación de agregados de tamaño limo. Los iones Ca^{2+} liberados por la cal hidratada crean un ambiente alcalino con un pH elevado, disolviendo localmente sílice y alúmina en las partículas de arcilla (Kanagarathinam et al., 2021).

Se detalla las ventajas del uso de CKD en la estabilización:

Mejora de la Capacidad de Soporte: Incrementa la resistencia del suelo, permitiendo soportar cargas mayores.

Reducción de la Plasticidad: Disminuye la plasticidad y el potencial de expansión de suelos arcillosos.

Durabilidad y Estabilidad Volumétrica: Mejora la durabilidad y reduce la susceptibilidad a cambios volumétricos debido a variaciones en la humedad.

Costo-Efectividad: Utiliza un subproducto industrial, lo que puede ser más económico que otros métodos de estabilización.

Ilustración 9

Polvo de Horno de Cemento (CKD).



3.6.4 Dosificación

DOSIFICACION PARA POLVO DE MARMOL (12%)

En la investigación titulada “Avances recientes en la estabilización de suelos expansivos mediante el uso de aditivos: retos y oportunidades actuales” realizada por (Zada,2023) Demuestra que la máxima mejora en la resistencia se registró con un 12% de polvo de mármol, mientras que a partir de entonces se observó una disminución. Por lo tanto, el contenido óptimo de polvo de mármol debe considerarse del 12% en términos de resistencia del suelo. Sin embargo, el contenido óptimo de polvo de mármol puede depender de las propiedades del suelo.

Para este caso de estudio, para realizar una correcta estabilización con mármol se toma un porcentaje optimo que es el 12% según investigaciones previas.

DOSIFICACION PARA POLVO DE HORNO DE CEMENTO (10%)

Para el caso de la estabilización con polvo de horno de cemento se toma un porcentaje optimo que es el 10% según investigaciones previas, por otro lado, nos podemos guiar de igual manera en la tabla 23 de la “Guía para el diseño y construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos” según (Sandoval ,2012).

Donde se toma como ejemplo el cemento, ya que son residuos de esta, el porcentaje a utilizar es el 10 %, ya que es un valor que esta entre 4%-12% que nos dice en la ilustración 10.

De igual forma el 10 % fue considerada como un porcentaje optimo según (Horpibulsuk et al. ,2010)

Ilustración 10

Porcentaje de Estabilización con Polvo de Horno de Cemento.

<i>Material</i>	<i>Estabi</i>	
	<i>Mecánica</i>	<i>Cemento</i>
<i>Grava natural</i>	Puede ser necesaria la adición de finos para prevenir desprendimientos	Probablemente este no es necesario, salvo si hay finos plásticos. Cantidad de 2% - 4%
<i>Arena limpia</i>	Adición de gruesos para dar estabilidad y de finos para prevenir desprendimientos	Inadecuada: produce material quebradizo
<i>Arena arcillosa</i>	Adición de gruesos para mejorar resistencia	4% - 8%
<i>Arcilla arenosa</i>	Usualmente no es aconsejable	4% - 12%
<i>Arcilla pesada</i>	Inadecuada	No es muy aconsejable. La mezcla puede favorecer con un pretratamiento con 2% de cal y luego entre el 8% y 15% de cemento

Nota. De Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio (p.87),por

Sandoval,2012,Facultad de Ingeniería.

Se resumen los porcentajes a utilizar en la zona de Miraflores en la tabla 1.

Tabla 1

Porcentajes de Estabilizantes.

ADITIVO	% DE ESTABILIZANTE
MWP	12
CKD	10

4 RESULTADOS

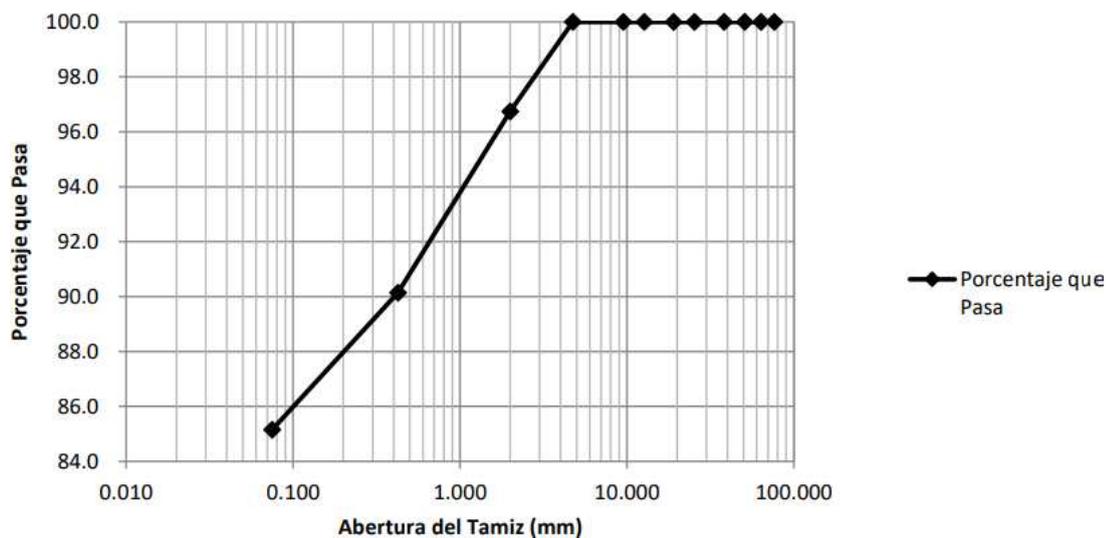
4.1 Caracterización

4.1.1 Granulometría

En la etapa de caracterización, se comenzó por estudiar el tamaño de las partículas del suelo analizado. Los resultados, mostrados en las ilustraciones 11 y 12, revelan que los suelos de Miraflores y Challuabamba tienen muy poca cantidad de material retenido en el tamiz número 200, siendo predominantes los materiales finos que representan aproximadamente el 78% y el 85%, respectivamente. Tal como se indica en la Tabla 4, estos suelos tienen un alto contenido de materiales finos, siendo este el principal factor que contribuye a sus propiedades expansivas.

Ilustración 11

Resultado de Granulometría por tamizado para la muestra de Miraflores.



Adicionalmente, cuando más del 50% del material pasa por el tamiz N° 200, se considera que el suelo es de grano fino, como limo o arcilla, según el método SUCS. Estos tipos de suelo tienen un mayor potencial de expansión en comparación con los suelos granulares, los cuales tienen un menor contenido de partículas finas y, por lo tanto, menos arcilla.

Ilustración 12

Resultado de Granulometría por tamizado para la muestra de Challuabamba.

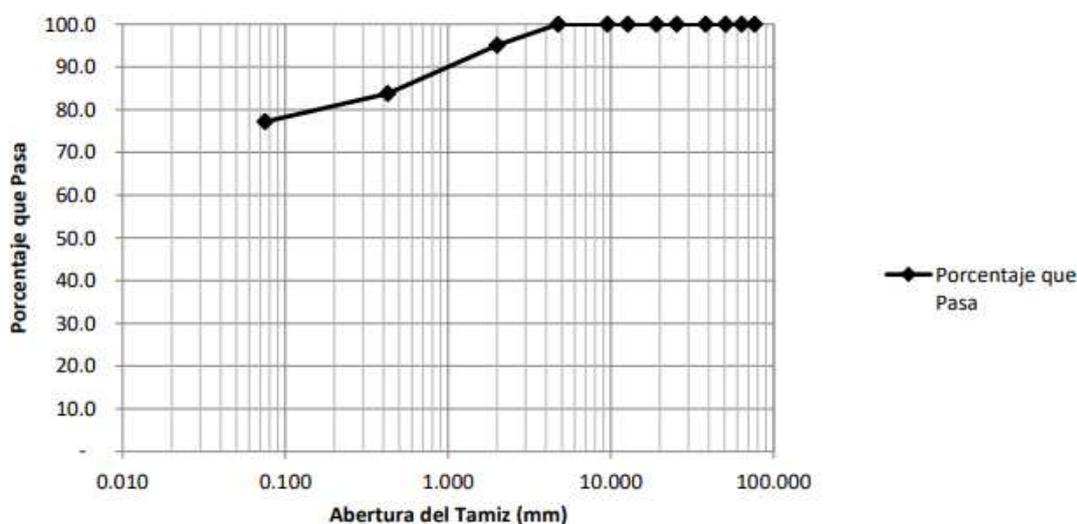


Tabla 2

Porcentaje que pasa el tamiz N 200.

(%)	Challuabamba	Miraflores
% Pasa tamiz 200	77,2	85,2

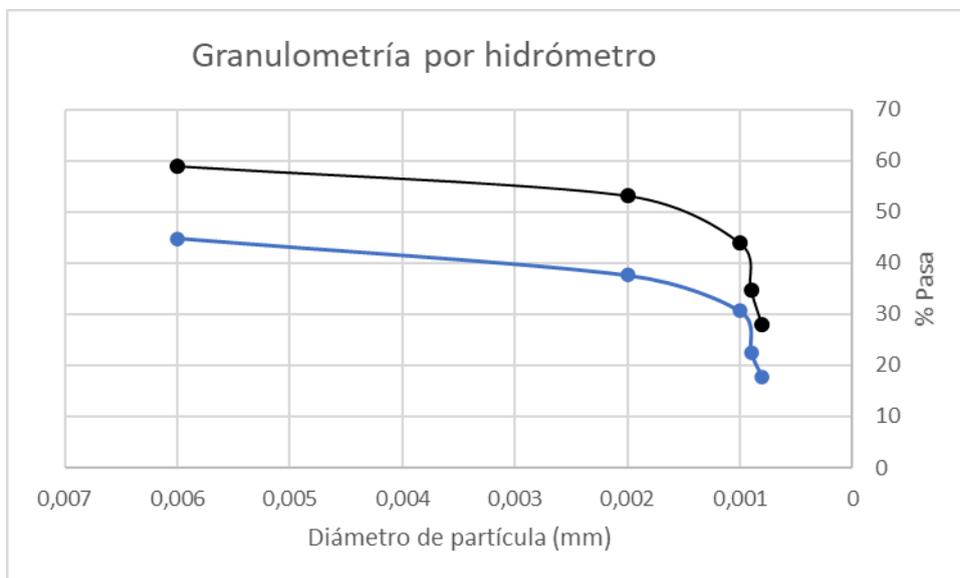
4.1.2 Hidrómetro

El objetivo de este estudio es cuantificar cuántas partículas del suelo quedan flotando en el agua durante un periodo concreto. Para las partículas más pequeñas que pasan por un tamiz de 200, se aplica el método de sedimentación con un hidrómetro, junto con sustancias dispersantes como el hexametáfosfato de sodio., para asegurar la precisión de los datos requeridos. Según la normativa, se emplean 50 gramos de muestra seca en este ensayo, especialmente diseñado para suelos limosos y arcillosos.

La mayor parte del material examinado atravesó el tamiz N°200, como se observa en la Tabla 2. Por ello, se utilizó el ensayo del hidrómetro ASTM D-422 para completar la curva granulométrica de las muestras. Esto permitió determinar la cantidad de arcilla o limo presente en las zonas analizadas.

Ilustración 13

Resultados granulometría por hidrómetro.



La AASHTO clasifica como tamaño arcilla al material que es inferior a 0.002 mm. En la Tabla 3 se presenta un resumen del porcentaje de material tamaño arcilla para los suelos estudiados, siendo evidente que la muestra de Miraflores exhibe el contenido de arcilla más elevado.

Tabla 3

Porcentajes de arcilla.

(%)	Challuabamba	Miraflores
% Arcilla	37,6	53,12

4.2 Expansividad

4.2.1 Límites de Atterberg

Se obtuvieron los datos respectivos de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad. A continuación, la Tabla 5 ilustra un resumen de todos los resultados obtenidos. A través de la evaluación de los límites de Atterberg, es posible determinar si el suelo en cuestión presenta un potencial expansivo significativo; no obstante, se debe tener en cuenta que estos métodos son indirectos. Para una evaluación más precisa del

potencial de expansión del suelo, se recurre a los ensayos de expansión libre y presión de hinchamiento.

Autores como Seed, Woodward y Lundgren (1962), Holtz (1969), y Land y Lambe (1992) han categorizado los suelos expansivos basándose en su porcentaje de arcilla, sus límites de consistencia y su índice de expansión, como se observa en la tabla 4.

Tabla 4

Parámetros para clasificar a los suelos expansivos en base a su contenido de arcilla y límites de Atterberg.

	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
Seed, Woodward y Lundgren, Land y Lambe.	CONTENIDO DE ARCILLA (<0.002mm)	0-10%	10-15%	15-25%	25-35%	35-100%
	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	0-10	10-15	15-25	25-35	35+
Holts, Gibbs	LÍMITE LÍQUIDO	-	<39	39-50	50-63	>63
	INDICE DE PLASTICIDAD	-	<18	15-28	25-41	>35
	LÍMITE DE CONTRACCIÓN	-	>15	10-16	7-12	<11

Nota. Adaptado De Diseño geotécnico y estructural de una cimentación (p.106),por Robert,2000,Mexico.

Adicionalmente, se calculó el IP correspondiente a cada suelo involucrado en la investigación, con el fin de proporcionar los parámetros fundamentales para la clasificación de las muestras. Estos datos también se utilizaron como referencia para evaluar el grado de expansión del suelo en las áreas estudiadas. Donde nos basamos en la tabla 4 para poder argumentar el potencial expansivo de nuestras muestras.

Tabla 5

Resultados Límites de Atterberg.

Muestra	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	CONTENIDO DE ARCILLA	INDICE DE PLASTICIDAD	POTENCIAL DE EXPANSION
Challuabamba	72,35	30,97	37,6	41,38	MUY ALTO
Miraflores	63,87	21,71	53,12	42,16	MUY ALTO

(Beltran ,2009) señala que un índice de plasticidad inferior al 4% sugiere una proporción más alta de limo que de arcilla, promoviendo directamente la permeabilidad del suelo. Por lo tanto, si hay menos arcilla, se espera un potencial expansivo menor. Las muestras de Miraflores registran el índice de plasticidad más elevado y también

presentan límites líquidos superiores al 40%, siendo este límite mayor al suelo de Challuabamba.

La clasificación de los suelos con una expansión muy alta se basa en sus límites de consistencia y contenido de arcilla. No obstante, se recomienda verificar estos resultados mediante ensayos directos y más precisos de expansión libre y controlada.

4.3 Clasificación de suelos

Los análisis previos proporcionaron los datos necesarios para clasificar los dos tipos de suelo. Estos parámetros incluyen la distribución granulométrica obtenida por tamizado y los límites de Atterberg. Los resultados se presentan según los criterios de las clasificaciones AASHTO y SUCS, detallando los datos considerados para cada muestra.

Ambas clasificaciones, AASHTO y SUCS, se basan en los resultados de la distribución granulométrica, límite líquido y límite plástico determinados en laboratorio. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza mediante un índice de grupo (IG), calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico del suelo es inversamente proporcional a su índice de grupo; un suelo con IG cero se

considera "bueno", mientras que uno con un IG igual o superior a 20 se clasifica como "muy malo" para la construcción de carreteras (Vikas & Ramana, 2023).

Challuabamba

-AASHTO

La muestra se clasifica como un suelo de tipo A7-5 (suelo arcilloso) debido a las siguientes características: el 77,2% del material pasa a través del tamiz N°200, superando el mínimo del 35% para ser considerado material fino (limo o arcilla), lo que lo descarta como A1, A2 o A3. El límite líquido es de 72,35, superando el límite de 40, lo que sugiere que podría clasificarse como A5 o A7. El índice de plasticidad es de 41,38, siendo mayor a 11, lo que restringe la clasificación únicamente a A7. Además, la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido menos 30 se cumple, confirmando la clasificación como suelo A7-5.

Tabla 6

Propiedades clasificación AASHTO Challuabamba.

% pasa N200	LIMITE LIQUIDO	INDICE DE PLASTICIDAD	IP<LL-30
77,2	72,35	41,38	SI

-SUCS

La muestra fue categorizada como arcilla de alta plasticidad (CH) según los siguientes parámetros, detallados en la tabla a continuación:

Tabla 7

Propiedades clasificación SUCS Challuabamba.

% pasa N200	LL	IP
77,2	72,35	41,38

-Más del 50% pasa a través del tamiz N200, indicando así un suelo de grano fino.

-El límite líquido es superior a 50.

-El índice de plasticidad es mayor a 7.

Estos resultados confirman la clasificación del suelo como arcilla de alta plasticidad tipo CH.

Miraflores

-AASHTO

La muestra fue clasificada como un suelo del tipo A7-6 (suelo arcilloso) siguiendo los criterios detallados a continuación:

Tabla 8

Propiedades clasificación AASHTO Miraflores.

% pasa N200	LIMITE LIQUIDO	INDICE DE PLASTICIDAD	IP<LL-30
85,2	63,87	42,16	NO

-El 85.2% del porcentaje de material pasa a través del tamiz N°200, superando el 35%, que es el límite inferior para ser clasificado como material fino (limo o arcilla), lo cual excluye las categorías A1, A2 o A3.

-El límite líquido es de 63.87, superando el valor de 40, indicando la posibilidad de ser clasificado como A5 o A7.

-El índice de plasticidad tiene un valor de 42.16, donde es >11 , lo que restringe su clasificación únicamente a la categoría A7.

-La relación $IP < LL-30$ no se cumple, siendo clasificado como un suelo A7-6.

-SUCS

La muestra fue categorizada como una arcilla de alta plasticidad (CH) con los siguientes parámetros, detallados en la tabla a continuación:

Tabla 9

Propiedades clasificación SUCS Miraflores.

% pasa N200	LL	IP
85,2	63,87	42,16

-Más del 50% se atraviesa el tamiz N200, indicando así que se trata de un suelo con grano fino.

-El límite líquido supera los 50.

-El índice de plasticidad es superior a 7.

Con estos valores, se concluye que se trata de un suelo del tipo CH, es decir, una arcilla de alta plasticidad.

4.4 Expansividad

Para evaluar la capacidad expansiva de un suelo, existen varios métodos. Analizando los límites de Atterberg, se puede estimar el potencial expansivo del material mediante correlaciones. Estas correlaciones tienen en cuenta el tipo mineral predominante, el grado de expansividad, así como los valores de presión y el porcentaje de expansión. Sin embargo, en esta tesis, no se empleará el método de correlaciones, a excepción del tipo de mineral predominante, que se utilizará para identificar qué tipo de arcilla es la principal en cada muestra.

No se estudiará las correlaciones para medir la capacidad expansiva debido a que son resultados aproximados para los suelos de estudio, a diferencia de los métodos directos de expansión que son exactos ya que el ensayo se realiza directo de la muestra y estos son:

4.4.1 Expansión Libre

Las muestras de suelo se recogieron cuidadosamente a unos 60 cm de profundidad, manteniendo su contenido de humedad natural. Siguiendo las directrices de la norma ASTM D-4829, se recogieron datos de expansión, obteniéndose curvas que representan los cambios a corto y largo plazo en el volumen del suelo. La expansión libre, expresada como porcentaje de la altura original de la muestra, se indica en la Tabla 17, junto con las propiedades de humedad de las muestras antes y después de la prueba.

Ilustración 14

Clasificación del potencial expansivo del suelo.

Expansion Index, EI	Potential Expansion
0–20	Very Low
21–50	Low
51–90	Medium
91–130	High
>130	Very High

Nota. De Standard Test Method for Expansion Index of Soils ASTM D- 4829, (2011).

La norma ASTM D4829 proporciona un método para clasificar el potencial expansivo de los suelos mediante la medición de su expansión libre en presencia de agua. Según esta norma, los suelos se clasifican en las siguientes categorías:

Bajo Potencial de Expansión (0% - 20%): Suelos con cambios volumétricos mínimos al absorber agua, considerados estables y adecuados para la construcción sin medidas especiales.

Moderado Potencial de Expansión (21% - 50%): Suelos que pueden experimentar cambios volumétricos moderados, requiriendo precauciones en el diseño y la construcción, como controles de humedad y técnicas de estabilización.

Alto Potencial de Expansión (50% - 100%): Suelos con cambios volumétricos significativos, que pueden causar daños estructurales si no se toman medidas adecuadas, necesitando un diseño especial y técnicas de estabilización del suelo.

Muy Alto Potencial de Expansión (>10%): Suelos altamente expansivos, que pueden causar daños severos a las estructuras debido a grandes cambios volumétricos, requiriendo técnicas avanzadas de diseño y estabilización del suelo.

Suelos con un índice de expansión libre inferior al 50% raramente experimentan cambios de volumen apreciables, incluso bajo efectos de presión mínimos (JIMENEZ, 1975).

RESULTADOS MIRAFLORES

Tabla 10

Humedad Inicial y final para la muestra de Miraflores.

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	127,3	Rec+anillo humedo	130,2
Rec+Anillo seco	87,3	Rec+Anillo seco	91,7
humedad %	22,91	humedad %	30,43

Tabla 11

Lecturas para la muestra de Miraflores.

LECTURAS (MIRAFLORES)				
DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,133	7,00
1	10:36	6	0,152	8,00
1	10:39	9	0,171	9,00
1	12:40	70	0,209	11,00
1	15:00	270	0,209	11,00
2	10:40	1458	0,798	42,00
2	12:30	1562	0,798	42,00
2	14:30	1712	0,9006	47,40
3	12:30	3004	0,988	52,00
3	15:00	3154	1,5599	82,10

RESULTADOS CHALLUABAMBA

Tabla 12

Humedad Inicial y Final para la muestra de Challuabamba.

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	127,3	Rec+anillo humedo	140,26
Rec+Anillo seco	85,74	Rec+Anillo seco	98,7
humedad %	19,83	humedad %	24,28

Tabla 13*Lecturas para la muestra de Challuabamba.*

LECTURAS (CHALLUABAMBA)				
DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,076	4,00
1	10:36	6	0,152	8,00
1	10:39	9	0,171	9,00
1	12:40	70	0,2	10,53
1	15:00	270	0,209	11,00
2	10:40	1458	0,79	41,58
2	12:30	1562	0,798	42,00
2	14:30	1712	0,836	44,00
3	12:30	3004	0,9006	47,40
3	15:00	3154	1,0222	53,80

Tabla 14*Resultados del Ensayo de expansión Libre.*

muestra	Porcentaje Expansion (%)	Humedad Inicial (%)	Saturacion Inicial (%)	Humedad Final (%)	Saturacion Final (%)	Peso Especifico Seco (g/cm ³)
Challuabamba	53,8	19,83	61,1	24,28	75,27	1,38
Miraflores	82,1	22,91	65,2	30,43	81,5	1,648

Se puede observar que el suelo de Miraflores tiene un porcentaje de expansión muy alto, por ende, su índice de expansión es elevado, Challuabamba son porcentajes grandes, pero no es un caso crítico como el suelo de Miraflores que posterior se aplicará un aditivo estabilizante para tratar de bajar estos índices altos.

4.4.2 Expansión controlada

La prueba del consolidómetro consiste en aplicar cargas para mantener una lectura constante en el instrumento hasta que alcance un estado estable. Una vez finalizado el proceso, se anota la carga final que mantuvo la muestra a cero y se calcula la tensión de expansión en función del brazo de palanca del equipo. La medición de los niveles de humedad inicial y final es crucial para conocer el porcentaje de agua absorbido por la muestra.

RESULTADOS EXPANSION CONTROLADA MIRAFLORES

Tabla 15

Humedad Inicial y Final para la muestra de Miraflores.

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	119,7	Rec+anillo humedo	130,2
Rec+Anillo seco	78,14	Rec+Anillo seco	91,7
humedad %	24,83	humedad %	27,15

Tabla 16

Lecturas de ensayo de Expansión Controlada para la muestra de Miraflores.

LECTURA (MIRAFLORES)					
DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	120	120	38,16
1	16:00	120	10	130	41,34
1	17:00	180	20	150	47,69
2	9:00	1140	100	250	79,49
2	13:00	1380	20	270	85,85
2	15:00	1500	-20	250	79,49
2	18:00	1680	-10	240	76,31
3	9:00	2580	0	240	76,31
3	12:00	2760	0	240	76,31

RESULTADOS CHALLUABAMBA

Tabla 17

Humedad Inicial y Final para la muestra de Challuabamba en el ensayo de Expansión Controlada.

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	115,2	Rec+anillo humedo	140,269
Rec+Anillo seco	73,64	Rec+Anillo seco	98,709
humedad %	23,36	humedad %	25,60

Tabla 18

Lectura del Ensayo de Expansión controlada para la muestra de Challuabamba.

LECTURA (CHALLUABAMBA)					
DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	100	100	31,80
1	16:00	120	10	110	34,98
1	17:00	180	20	130	41,34
2	9:00	1140	100	230	73,13
2	13:00	1380	20	250	79,49
2	15:00	1500	-20	230	73,13
2	18:00	1680	-10	220	69,95
3	9:00	2580	0	220	69,95
3	12:00	2760	0	220	69,95

La presión de expansión es la fuerza que un suelo expansivo ejerce cuando intenta aumentar de volumen al absorber agua.

Los suelos expansivos tienen la capacidad de experimentar aumentos notables en su volumen al absorber agua y, de manera inversa, contraerse al secarse. Esto puede ocasionar movimientos en el suelo y generar presiones perjudiciales para las estructuras. Por ende, es esencial tomar medidas para mitigar la presión de levantamiento con el fin de prevenir daños a las construcciones y mejorar la estabilidad del suelo.

Una menor presión de expansión significa que el suelo no ejercerá grandes fuerzas sobre las estructuras construidas sobre él, como cimientos y pavimentos. Esto reduce el riesgo de movimientos diferenciales, que pueden causar grietas y daños estructurales. Además, proporcionan una base más estable, minimizando la necesidad de reparaciones frecuentes y el mantenimiento de las estructuras.

Por el contrario, los suelos con alta presión de expansión pueden causar daños significativos, requieren medidas de mitigación costosas y elevan los costos de mantenimiento. Por estas razones, minimizar la presión de expansión es crucial para garantizar la estabilidad y la economía de las construcciones.

Como se puede observar la zona que tiene mayor presión de expansión es la de Miraflores, en el capítulo de estabilización lo que se buscará es tratar de reducir esta presión de expansión ya que disminuir la presión de levantamiento de un suelo expansivo se considera generalmente beneficioso en la ingeniería.

Tabla 19

Resultados del ensayo de Presión de Expansión.

muestra	Presion de Expansion (gr/cm2)	Humedad Inicial (%)	Saturacion Inicial (%)	Humedad Final (%)	Saturacion Final (%)	Peso Especifico Seco (g/cm3)
Challuabamba	69,95	23,36	63,04	25,6	86,95	1,48
Miraflores	76,31	24,83	68,47	27,15	90,21	1,39

4.5 Tipo de mineral predominante

El método de correlación según el tipo de material predominante propuesto por (Marín Nieto,1991) es una técnica utilizada en la ingeniería geotécnica para clasificar suelos expansivos y prever su comportamiento. Este método es considerado uno de las más precisos, por ende, se utiliza en este estudio.

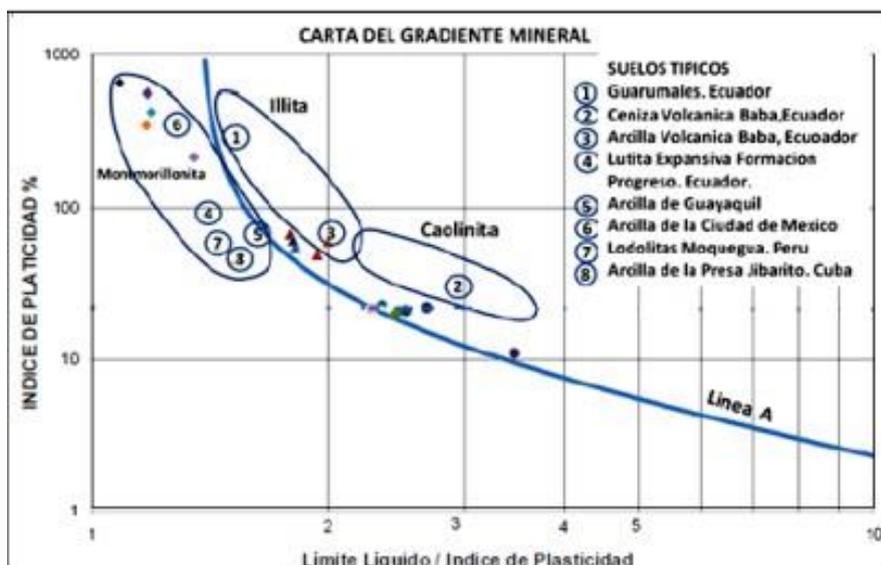
Marín Nieto propone clasificar los suelos expansivos en función del tipo de material predominante en la muestra de suelo, correlaciona propiedades físicas y mecánicas del suelo, como el contenido de arcilla, los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico), el índice de plasticidad, y la granulometría. Estas propiedades son indicadores clave de la expansividad del suelo.

Se centra el análisis en la identificación y cuantificación de minerales arcillosos como la montmorillonita, illita y caolinita. Estos minerales tienen diferentes capacidades de expansión cuando están en presencia de agua.

Se analiza la proporción de cada tipo de mineral en el suelo. La montmorillonita, por ejemplo, es altamente expansiva, mientras que la caolinita tiene una baja expansividad. La cantidad relativa de estos minerales en una muestra de suelo es crucial para determinar su potencial expansivo.

Ilustración 15

Gradiente mineral.



Nota. Adaptado de Arcillas Expansivas en Ecuador, por M.Nieto,1991.

Los resultados obtenidos a través del método de Marín Nieto (1991) muestran coherencia, especialmente en lo que respecta a la clasificación del suelo según el tipo de mineral predominante, como se detalla en la Tabla 8. Este método revela que las arcillas con un contenido elevado del mineral montmorillonita exhiben una plasticidad considerable, lo cual se confirma al analizar las conclusiones mediante el método de SUCS. En este último, se introduce el valor del límite líquido dividido para el índice de plasticidad en las abscisas y el índice de plasticidad en las ordenadas.

Tabla 20

Tipo de Mineral para las muestras.

Muestra	Mineral (Marin Nieto)
Challuabamba	montmorillonita
Miraflores	montmorillonita

En este caso las muestras presentan alta plasticidad, por ende, entran al grupo de las Montmorillonitas, mineral el cual tiene altas características expansivas, y son suelos perfectos para el estudio de estabilización.

4.6 Resumen resultados finales de caracterización

Se establece la Tabla 24 como una clasificación del grado de expansividad, basada en los resultados directos de los ensayos de expansión controlada. Los valores obtenidos de estas pruebas, realizadas específicamente en este estudio.

Tabla 21

Clasificación grado de expansividad según expansión

Grado de Expansividad	Expansion Controlada (g/cm ²)
Bajo	0-20
Medio	20-50
Alto	50-70
Muy Alto	>70

A continuación, se recopilan y muestran los datos sobre la composición del suelo, las propiedades minerales de la arcilla, el índice de expansión, la fuerza de expansión y el grado de expansividad. La tabla 25 revela que las muestras de suelo de Challuabamba y Miraflores presentan un nivel excepcionalmente alto de expansividad, lo que supone un riesgo de importancia comparable.

Tabla 22

Resultado final de valores de expansividad.

Muestra	Metodo SUCS	Mineral Predominante	Expansion Libre (IE)	Presion de Expansion (gr/cm2)	Grado de Expansividad
Challuabamba	CH Arcilla Alta Plasticidad	montmorillonita	53,8	69,95	Muy alto
Miraflores	CH Arcilla Alta Plasticidad	montmorillonita	82,1	76,31	Muy alto

Como conclusión, se decide llevar a cabo la estabilización del suelo en la zona de Miraflores, dado que presenta condiciones más críticas (mayor presión libre, mayor presión de expansión, mayor límite líquido y plástico) que la muestra de Challuabamba en cuanto a expansividad.

4.7 Estabilización de la zona de Miraflores

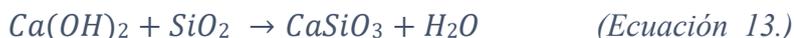
De acuerdo con la clasificación resumida, se observa que el suelo de la zona de Miraflores presenta el mayor potencial de expansión. Los cuatro indicadores primarios revelan que este suelo tiene los resultados más desfavorables. Además, los indicadores secundarios, como el límite líquido y el índice de plasticidad, también muestran que este suelo es el más expansivo. Para estabilizarlo, se emplearon dos aditivos y se utilizó la prueba de expansión libre, se determinará cuál de ellos realiza de manera más efectiva el proceso de estabilización.

4.7.1 Estabilización con polvo de mármol (MWP)

Se llevó a cabo una investigación de laboratorio para evaluar el impacto del polvo de mármol con cal en el comportamiento geotécnico del suelo. La utilización de polvo de mármol se muestra respetuosa con el medio ambiente y rentable, lo que la convierte en una opción viable. Al aplicar diferentes porcentajes de polvo de mármol y cierto porcentaje de cal a muestras de suelo expandido, se mejoró el rendimiento mediante un proceso de intercambio catiónico, aumentando la presencia de iones Ca^{2+} . El uso del polvo de mármol en un porcentaje del 12% y cal con el 4 % en tiempos de curado de 3 días permitió reducir límites líquidos, límites plásticos, índice de plasticidad e índice expansivo. Se observó una disminución en la plasticidad de los suelos expansivos debido a la sustitución de partículas arcillosas por agregados y partículas de arena no plásticas. Se realizaron pruebas de límites de Atterberg, índice de soporte de California (CBR), % de hinchamiento y compactación Proctor modificada en las muestras de suelo.

Aunque el MWP en sí no es muy pozzolánico, cuando se mezcla con cal ($Ca(OH)_2$), puede mejorar las propiedades del suelo al reaccionar con los silicatos y aluminatos

presentes en las arcillas del suelo. La formación de silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH) aumenta la cohesión y la resistencia del suelo.



4.7.2 Estabilización con polvo de horno de cemento (CKD)

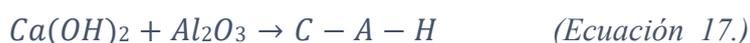
La estabilización del suelo con polvo de horno de cemento (CKD) se logra a través de una serie de reacciones químicas y físicas que mejoran las propiedades del suelo

Reacciones de Hidratación y Pozzolánicas: Hidratación del Óxido de Calcio (CaO):

Cuando CKD se mezcla con suelo y agua, el óxido de calcio presente en CKD reacciona con el agua para formar hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). Esta reacción es exotérmica y libera calor, lo que puede ayudar a secar suelos húmedos.



Reacciones Pozzolánicas: El hidróxido de calcio reacciona con los compuestos de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) presentes en el suelo para formar productos cementantes como los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) y aluminatos de calcio hidratados (C-A-H).



Estos productos cementantes llenan los poros del suelo y crean una estructura más densa y cohesionada, mejorando la resistencia y reduciendo la plasticidad.

Cambio en la Estructura del Suelo: Floculación y Agregación: La adición de CKD causa la floculación y agregación de las partículas del suelo. Esto significa que las partículas finas del suelo se agrupan para formar estructuras más grandes, reduciendo la plasticidad y aumentando la estabilidad.

Compactación Mejorada: La presencia de CKD facilita una mejor compactación del suelo, resultando en una mayor densidad y resistencia.

El CKD se distribuye uniformemente sobre la superficie del suelo. La cantidad de CKD utilizada depende del tipo de suelo y los objetivos de estabilización, generalmente entre 3% y 15% en peso.

4.7.3 Dosificación

Una vez que se han llevado a cabo las combinaciones del suelo natural con el porcentaje de estabilizante en peso, se procedió a realizar los ensayos necesarios para determinar cómo se modifican las características físicas del material en función del agente estabilizante añadido. En el caso del polvo de mármol, se empleó una dosificación del 12%+ 3% de cal, mientras que, para el polvo de horno de cemento, se utilizó una dosificación del 10%. Estos porcentajes se justificaron en el capítulo de materiales y métodos.

4.7.4 Límites de Atterberg

Para comprender la capacidad del suelo para cambiar de forma, se realizaron experimentos para medir sus límites de Atterberg. Para ello se añadió polvo de mármol y polvo de horno de cemento como materiales estabilizadores. A medida que aumentaba la cantidad de estabilizante, cambiaban el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad del suelo. A continuación, se presentan comparaciones de resultados después de realizar los ensayos con MWP y CKD, respectivamente:

Un menor límite líquido es más favorable para la estabilidad del suelo y las construcciones. Los suelos con menor límite líquido son menos susceptibles a cambios volumétricos con variaciones en el contenido de humedad, lo que reduce los problemas de expansión y contracción. Además, estos suelos suelen tener una mayor capacidad de carga y menor riesgo de licuación, proporcionando una base más estable y segura para las estructuras.

Un menor límite plástico es más favorable para la estabilidad del suelo y las construcciones. Los suelos con menor límite plástico son menos susceptibles a deformaciones bajo cargas estructurales, lo que reduce los problemas de expansión y contracción. Además, estos suelos suelen tener una mayor capacidad de carga y menor plasticidad, proporcionando una base más estable y segura para las estructuras.

CKD:

Tabla 23

Comparación de resultados de los límites de Atterberg entre el suelo natural y suelo estabilizado al 10% de CKD.

PORCENTAJE	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCION	INDICE DE PLASTICIDAD
NATURAL	63,87	21,71	10,87	42,16
10%	29,12	18,45	8,77	19,36

MWP:

Tabla 24

Comparación de resultados de los límites de Atterberg entre el suelo natural y suelo estabilizado al 12% de MWP.

PORCENTAJE	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	LIMITE DE CONTRACCION	INDICE DE PLASTICIDAD
NATURAL	63,87	21,71	10,87	42,16
12%	30,36	19,78	9,05	21,4

Estos ensayos permitieron alcanzar un índice de plasticidad y límite líquido más bajos en relación con el suelo natural. Estos resultados indican una tendencia a bajar el índice de plasticidad y límite líquido a medida que se incrementa el porcentaje de estabilizante, ofreciendo así una mejora en las propiedades del suelo.

Ilustración 16

Límite Líquido (Natural vs Estabilizado).



Ilustración 17

Limite Plástico (Natural vs Estabilizado).

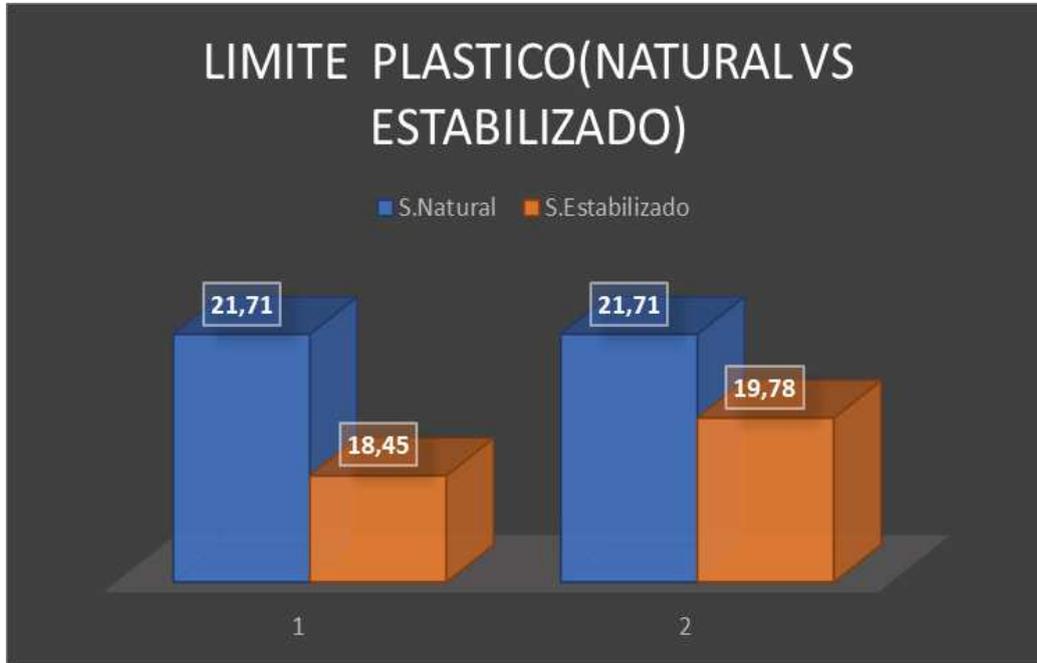
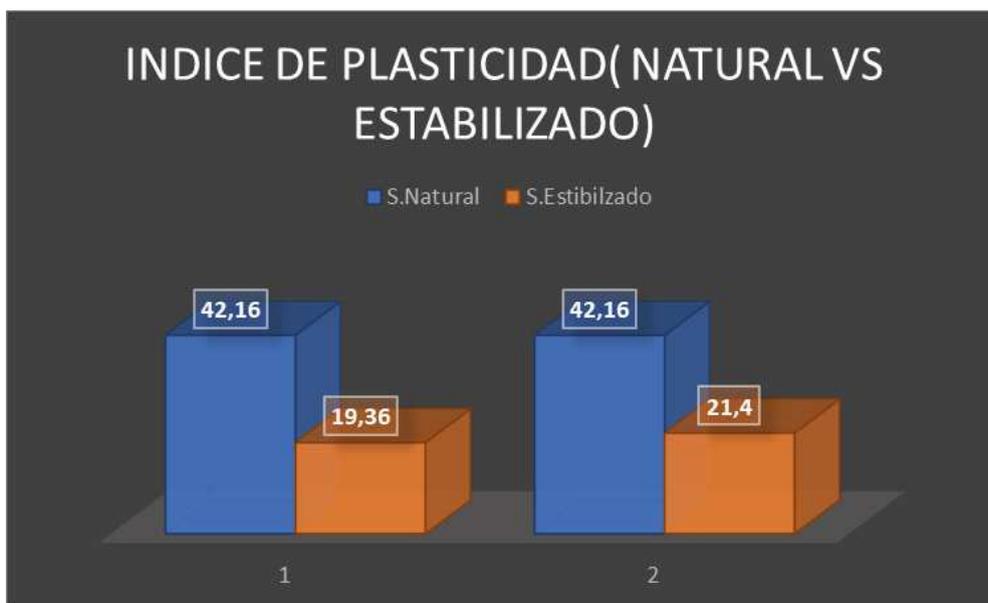


Ilustración 18

Índice de Plasticidad (Natural vs Estabilizado).



4.7.5 Expansión Libre y Controlada

En función de la cantidad de agente estabilizador mezclado con el suelo, el porcentaje de hinchamiento disminuye cuando se utiliza residuo de horno de cemento o polvo de mármol. La prueba de expansión libre es la forma más precisa de medir, ya que permite evaluar directamente y con precisión la capacidad de expansión de un suelo. Este ensayo provoca la expansión o hinchamiento libre del suelo una vez que la muestra evaluada alcanza la saturación completa. Contrariamente, el ensayo de expansión controlada requiere la aplicación de pesos según las normativas para controlar la expansión en un tiempo específico, y la carga añadida representa la resistencia que puede soportar ese tipo de suelos.

Es importante señalar que, para determinar si un suelo es expansivo, se utiliza el porcentaje obtenido en el ensayo de expansión libre. En este contexto, si el porcentaje es superior al 50%, indica un suelo inapropiado para la elaboración de una vía, lo que sugiere un alto potencial de expansividad.

Una menor presión de expansión significa que el suelo no ejercerá grandes fuerzas sobre las estructuras construidas sobre él, como cimientos y pavimentos. Esto reduce el riesgo de movimientos diferenciales, que pueden causar grietas y daños estructurales, además proporcionan una base más estable, minimizando la necesidad de reparaciones frecuentes y el mantenimiento de las estructuras.

RESULTADOS EXPANSION LIBRE

CKD:

Tabla 25

Lectura de ensayo de Expansión Libre con 10% de CKD.

DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,12	6,32
1	10:36	6	0,14	7,37
1	10:39	9	0,16	8,42
1	12:40	70	0,16	8,42
1	15:00	270	0,19	10,00
2	10:40	1458	0,19	10,00
2	12:30	1562	0,28	14,74
2	14:30	1712	0,34	17,89
3	12:30	3004	0,35	18,34
3	15:00	3154	0,39	20,30

MWP:

Tabla 26

Lectura de ensayo de Expansión Libre con 12% de MWP.

LECTURAS (MIRAFLORES)				
DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,12	6,32
1	10:36	6	0,14	7,37
1	10:39	9	0,18	9,47
1	12:40	70	0,23	12,11
1	15:00	270	0,28	14,74
2	10:40	1458	0,34	17,89
2	12:30	1562	0,38	20,00
2	14:30	1712	0,42	22,11
3	12:30	3004	0,42	22,11
3	15:00	3154	0,62	32,40

RESULTADOS PRESION DE EXPANSION

CKD:

Tabla 27

Lectura ensayo de expansión controlada con 10% de CKD.

LECTURA (MIRAFLORES)					
DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	100	100	31,80
1	16:00	120	10	110	34,98
1	17:00	180	10	120	38,16
2	9:00	1140	20	140	44,52
2	13:00	1380	10	150	47,69
2	15:00	1500	-20	130	41,34
2	18:00	1680	-10	120	38,16
3	9:00	2580	0	120	38,16
3	12:00	2760	0	120	38,16

MWP:

Tabla 28

Lectura ensayo de expansión controlada con 12% de MWP.

DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	120	120	38,16
1	16:00	120	10	130	41,34
1	17:00	180	10	140	44,52
2	9:00	1140	20	160	50,87
2	13:00	1380	10	170	54,05
2	15:00	1500	-20	150	47,69
2	18:00	1680	-10	140	44,52
3	9:00	2580	0	140	44,52
3	12:00	2760	0	140	44,52

A continuación, se presenta la tabla 29 y 30 con los resultados del suelo natural y del suelo estabilizado con los aditivos antes mencionados:

CKD:

Tabla 29

Comparación resultados de los ensayos de expansividad entre el suelo natural y suelo estabilizado al 10% de CKD.

PORCENTAJE	EXPANSION LIBRE (%)	EXPANSION CONTROLADA (gr/cm2)
NATURAL	82,1	76,31
10%	20,3	38,16

MWP:

Tabla 30

Comparación resultados de los ensayos de expansividad entre el suelo natural y suelo estabilizado al 12% de MWP.

PORCENTAJE	EXPANSION LIBRE (%)	EXPANSION CONTROLADA (gr/cm2)
NATURAL	82,1	76,31
12%	32,4	44,52

Para lograr un porcentaje reducido y, por consiguiente, un suelo apto para la elaboración de carreteras, este ensayo verifica este resultado para lograr una disminución en la

expansión. Además, se determina la capacidad de carga que puede soportar dicho suelo mediante el ensayo de expansión controlada.

Ilustración 19

Expansión Libre (Natural vs Estabilizado).

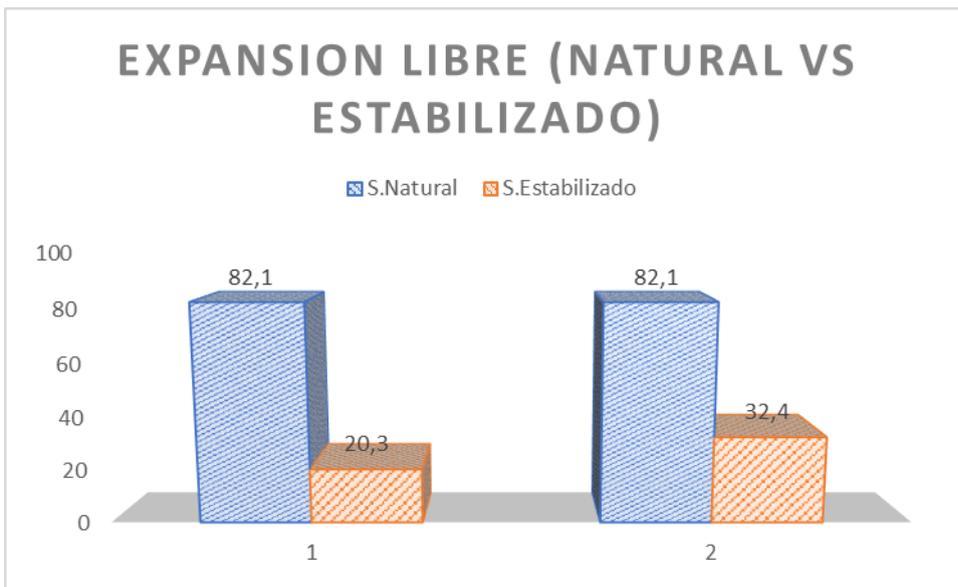
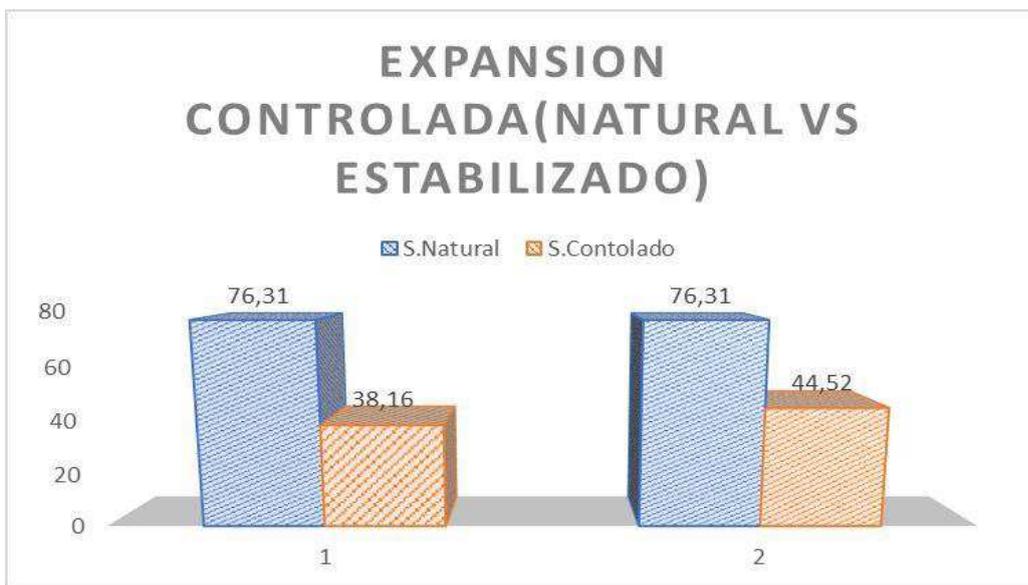


Ilustración 20

Expansión Controlada (Natural vs Estabilizado).



4.7.6 Compactación Proctor estándar modificada

El ajuste de la cantidad de materiales estabilizantes puede conducir a cambios en la densidad seca máxima y en el nivel de humedad ideal, determinados por el ensayo de compactación Proctor revisado.

Un suelo con mayor densidad seca es más estable, ya que tiene menos vacíos (poros) y, por lo tanto, menos posibilidad de desplazamientos o asentamientos cuando se somete a cargas. Por otro lado, si está bien compactado (con alta densidad seca) experimenta menos asentamientos a lo largo del tiempo, son menos susceptibles a la erosión por agua o viento, ya que están más compactados y tienen menos porosidad.

Para obtener una mayor densidad seca, es esencial compactar el suelo a su contenido óptimo de humedad, en proyectos de construcción, se busca alcanzar la densidad máxima seca en campo, asegurando que el suelo se compacte adecuadamente durante la construcción.

La relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo se representa gráficamente mediante una curva de compactación. Esta curva se obtiene compactando las muestras de suelo de las zonas seleccionadas a diferentes contenidos de humedad y midiendo la densidad seca resultante, esta se encuentra en el punto más alto de la curva de compactación. El contenido de humedad correspondiente a este punto se denomina contenido óptimo de humedad.

Aumento Inicial: A medida que se incrementa el contenido de humedad, las partículas del suelo se lubrican, lo que facilita una compactación más eficiente y aumenta la densidad seca.

Punto Óptimo: En el contenido óptimo de humedad, el agua actúa como un lubricante, permitiendo que las partículas del suelo se acomoden más compactamente, logrando así la densidad máxima seca.

Disminución Posterior: Si se sigue aumentando el contenido de humedad más allá del óptimo, el exceso de agua empieza a ocupar el espacio entre las partículas, reduciendo la densidad seca del suelo. Cada porcentaje de agente estabilizador se sometió a este ensayo, generando resultados detallados a continuación:

CKD:

Tabla 31

Comparación resultados de los ensayos de Proctor Modificado

entre el suelo natural y suelo estabilizado al 10% de CKD.

PORCENTAJE	OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm ³)
NATURAL	16,6	1,63
10%	16,9	1,42

MWP:

Tabla 32

Comparación resultados de los ensayos de Proctor Modificado entre el suelo natural y suelo estabilizado al 12% de MWP.

PORCENTAJE	OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MAXIMA DENSIDAD SECA (g/cm ³)
NATURAL	16,6	1,63
12%	16,8	1,6

Ilustración 21

Máxima Densidad Seca (Natural vs Estabilizado).

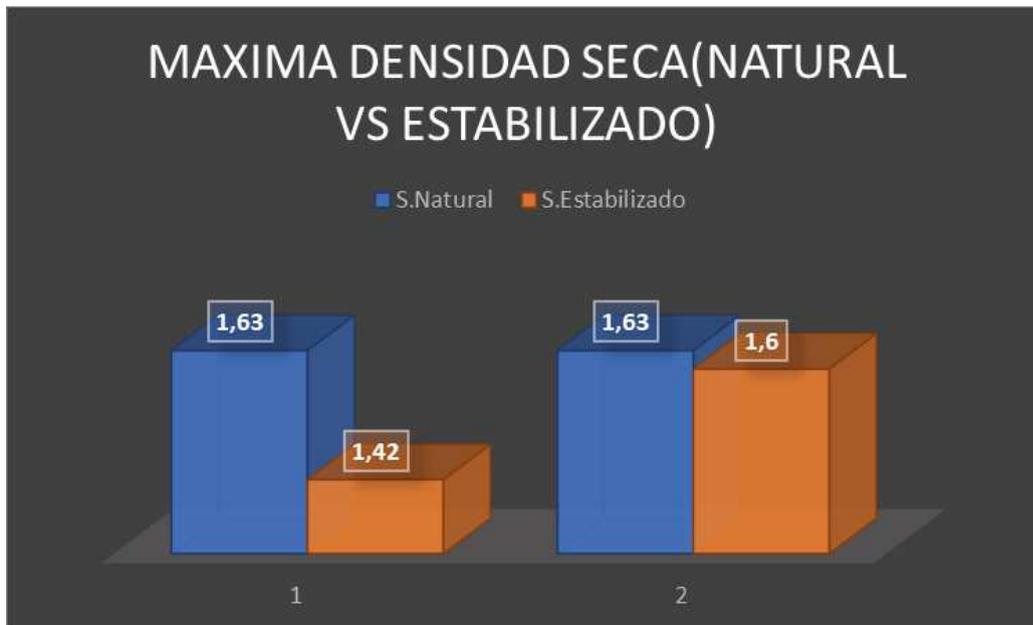
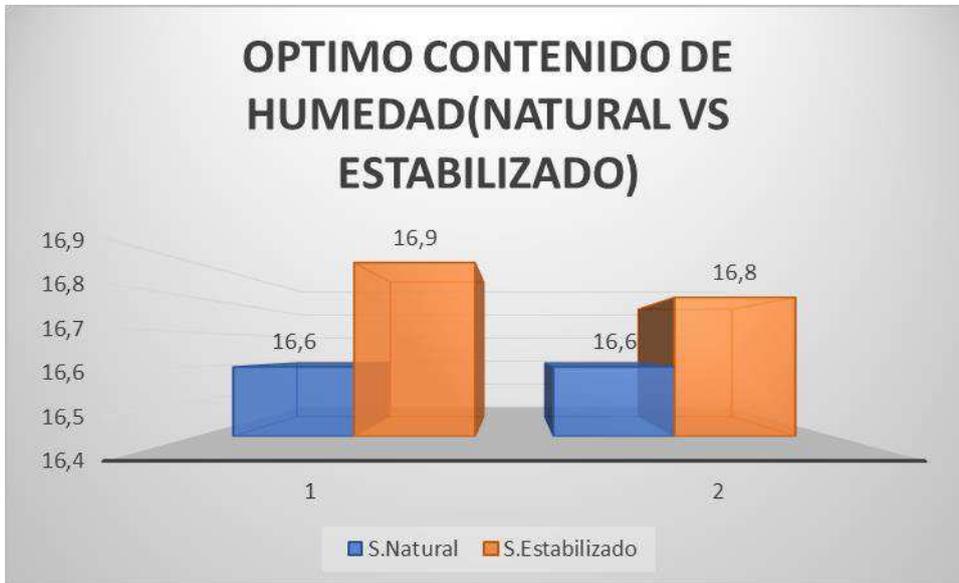


Ilustración 22

Optimo Contenido de Humedad (Natural vs Estabilizado).



4.7.7 CBR

El CBR, o California Bearing Ratio, es una herramienta que se utiliza para evaluar la capacidad de carga del suelo y lo bien que soporta ser empujado. Esta prueba consiste en comparar la resistencia del suelo con la de una muestra normalizada de roca triturada. El valor CBR es un porcentaje que refleja la fuerza necesaria para empujar una muestra de suelo compactado hasta una profundidad determinada durante una prueba de penetración.

Este porcentaje se refiere al nivel de compactación del suelo en relación con la densidad seca máxima obtenida mediante un ensayo de compactación, como el Proctor Modificado.

El 95% indica que el suelo ha sido compactado hasta alcanzar el 95% de su máxima densidad seca, lo que significa que el suelo no está compactado al 100% de su capacidad máxima, pero se considera suficientemente compactado para muchas aplicaciones de ingeniería.

Un CBR más alto generalmente indica un suelo más resistente y adecuado para soportar cargas pesadas. La combinación de un alto valor de CBR y un alto porcentaje de compactación (como 95%) sugiere que el suelo es fuerte y bien compactado, lo que es ideal para la construcción de carreteras y otros tipos de infraestructuras.

Alcanzar el 100% de la densidad máxima Proctor en el campo es extremadamente difícil debido a las variaciones en las condiciones de compactación, como la humedad del suelo, la energía de compactación disponible y las limitaciones de espacio y equipo.

Compactar el suelo al 95% de la densidad máxima es una meta más alcanzable y realista que refleja mejor las condiciones que se pueden lograr consistentemente en un proyecto de construcción. Proporciona un margen de seguridad razonable que asegura una buena resistencia y estabilidad del suelo sin los riesgos asociados a la compactación total.

Intentar alcanzar el 100% de la densidad máxima puede resultar en una compactación excesiva, lo que puede causar daños a las partículas del suelo y reducir su estructura interna. Una compactación excesiva también puede llevar a problemas como la segregación de agregados, la formación de capas duras o la reducción de la permeabilidad del suelo.

Este margen ayuda a manejar pequeñas variaciones en la calidad del material y en los procedimientos de compactación que son inevitables en las condiciones reales de construcción, sin comprometer la integridad del suelo.

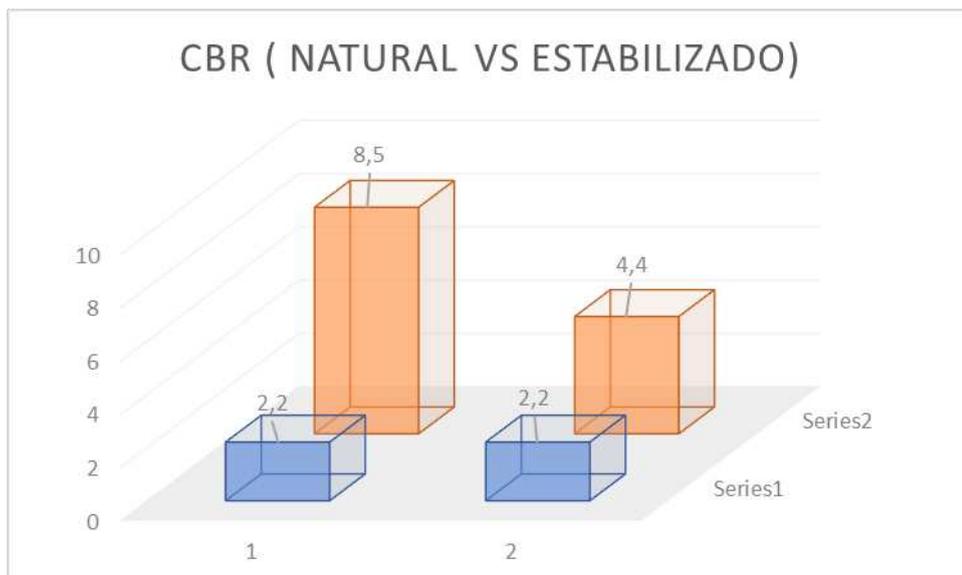
Tabla 33

Comparación resultados de CBR entre muestra natural y estabilizada con 10 % de CKD y 12 % de MWP.

PORCENTAJE	CBR 95%
NATURAL	2,2
10% (CKD)	8,5
12% (MWP)	4,4

Ilustración 23

CBR (Natural vs Estabilizado).



En la tabla 34 se aprecia un resumen de los resultados obtenidos más importantes:

Tabla 34

Resumen de los resultados de estabilización.

ADITIVO	Contenido Optimo (%)	Principales resultados
POLVO DE MARMOL	12	<p>1) La adición de un 12% de polvo de mármol reduce la presión de levantamiento del suelo expansivo de 76.31 g/cm² a 44.52 g/cm²</p> <p>2) Además, una adición del 12% de polvo de mármol resultó en la mayor densidad seca de suelo expansivo a comparación del CKD.</p> <p>3) En comparación con el suelo natural, el índice de hinchamiento libre se redujo un 60.54% (82.1% a 32.4%)</p> <p>4) los límites de Atterberg para el suelo están significativamente influenciados por la adición de marmol, con tasas de disminución para el límite líquido, límite plástico de alrededor de (52.47%, 8.9%), respectivamente. Esto se debe a la no plasticidad de las partículas de polvo de mármol.</p> <p>5) El CBR aumento de 2.2 a 4.4</p>
POLVO DE HORNO DE CEMENTO	10	<p>1) La adición de un 10% de polvo de Horno de cemento reduce la presión de levantamiento del suelo expansivo de 76.31 g/cm² a 38,16 g/cm²</p> <p>2) Además, una adición del 10% de CKD resultó en la mayor densidad seca de suelo expansivo.</p> <p>3) En comparación con el suelo natural, el índice de hinchamiento libre se redujo un 75.27 % (82.1% a 20.3 %)</p> <p>4) Las tasas de disminución para el límite líquido, límite plástico de alrededor de (54.41 % y 15.02%), respectivamente.</p> <p>5) El CBR aumento de 2.2 a 8.5</p>

5. CONCLUSIONES

El propósito de este estudio es la caracterización y estabilización de suelos expansivos en la ciudad de Cuenca, clasificándolos según sus características expansivas. Se estudiaron dos suelos naturales ubicadas en las zonas de Challuabamba y Miraflores de la ciudad de Cuenca, pertenecientes geológicamente a las formaciones de Loyola y arcillas Varvadas, respectivamente.

El estudio profundizó en las características del suelo, sobre todo en el grado de expansión. El análisis reveló que Challuabamba tenía un 77,2% de partículas finas, mientras que Miraflores tenía un 85,2%. Esto es significativo, ya que el contenido de arcilla se correlaciona directamente con la naturaleza expansiva del suelo. La prueba del hidrómetro mostró que Miraflores tenía el mayor porcentaje de arcilla con 53.12%, comparado con 37.6% para Challuabamba. Ambas muestras de suelo fueron clasificadas como grava arcillosa según el sistema AASHTO, debido al bajo porcentaje de partículas finas. Sin embargo, la clasificación SUCS las identificó como arcillas de alta plasticidad., la mayoría de las muestras estaban compuestas por arenas, con más del 50% de los finos retenidos en el tamiz 200.

Tras realizar análisis granulométricos, hidrométricos y de límites de Atterberg en las muestras de suelo de Miraflores y Challuabamba, los resultados mostraron que el suelo de Challuabamba es una arcilla densa. Los límites de Atterberg para este suelo incluyen un límite líquido de 72,35%, un límite plástico de 30,97% y un índice de plasticidad de 41,38%, así como una presión de expansión de 69,95 gr/cm².

En cuanto al suelo de Miraflores, también se determinó que era una arcilla densa, pero con propiedades más desfavorables. Los límites de Atterberg para este suelo son 63,87% de límite líquido, 21,71% de límite plástico y un índice de plasticidad de 42,16%, junto con una presión de expansión de 76.31 gr/cm².

Las pruebas de expansión libre revelan que el hinchamiento del suelo ocurre principalmente dentro de las 3 horas iniciales, mostrando un gradiente que disminuye gradualmente. La muestra de Challuabamba presenta valores superiores a 53,8%, mientras que la muestra de Miraflores muestra un índice de expansividad de 0,1%, lo que la convierte en la más expansiva. Para solucionar este problema, se aplican estabilizadores al suelo para mitigar su potencial expansivo.

A medida que aumenta el porcentaje de estabilizante, disminuye la densidad seca máxima del suelo y aumenta la humedad óptima de compactación. Esto indica que, con un menor esfuerzo de compactación, el suelo puede alcanzar su densidad seca máxima debido a la de partículas muy finas que requieren más agua para su hidratación. Este enfoque no sólo reduce el potencial de expansión, sino que también mejora el grado de compactación.

La estabilización de suelos mediante aditivos se ha demostrado como una técnica eficaz, ecológica y económica para tratar suelos expansivos. Estos suelos, con potencial de hinchamiento y contracción, pueden estabilizarse utilizando métodos físicos, mecánicos y químicos. Esta tesis ofrece un análisis exhaustivo de la estabilización de suelos expansivos en la zona de Miraflores, la más desfavorable según estudios previos, mediante el uso de aditivos para mejorar su índice y comportamiento ingenieril. Se añadieron diferentes porcentajes de aditivos, como el 10% de CKD y una combinación de 12% de MWP + 3% de cal al peso seco del suelo natural. Los resultados indican que estos materiales son efectivos para estabilizar suelos expansivos y son respetuosos con el medio ambiente. No obstante, es necesario continuar investigando para evaluar su utilidad en aplicaciones de campo y para identificar otros compuestos potencialmente exitosos como estabilizadores de suelos. Basándose en los resultados de diferentes pruebas de laboratorio con un curado de 3 días, se realizó un estudio experimental que arrojó las siguientes observaciones:

La incorporación de CKD al suelo causó una reducción significativa en los límites de Atterberg. El límite líquido disminuyó de 63.87% a 29.12% (una reducción del 54.41%) y el límite plástico bajó de 21.71% a 18.45% (una reducción del 15.02%) al utilizar un 10% de CKD. En el caso del polvo de mármol, también se obtuvieron resultados satisfactorios, reduciendo el límite plástico en un 8.9% y el límite líquido en un 52.47%.

El hinchamiento libre del suelo natural de Miraflores se redujo de 82.1% a 20.3% (una reducción del 75.27%) con CKD, mientras que con MWP se redujo de 82.1% a 32.4% (una reducción del 60.54%). De manera similar, para la expansión controlada, el CKD disminuyó el hinchamiento de 76.31 g/cm² a 38.16 g/cm² (una reducción del 50%) y el MWP lo redujo de 76.31 g/cm² a 44.52 g/cm² (una reducción del 41.66%).

La densidad seca máxima disminuyó y el contenido de humedad óptimo aumentó con el incremento del porcentaje de CKD. De manera similar, con el MWP, aunque la diferencia no es tan notable en comparación con el CKD.

En el caso del CBR, hubo un aumento significativo (de 2.2 a 8.5) con el aditivo CKD, mientras que, con el MWP, el incremento fue menor (de 2.2 a 4.4).

La adición de CKD a la subrasante arcillosa de pavimentos contribuirá a mejorar la resistencia y durabilidad a lo largo del tiempo. Tanto la resistencia no consolidada no drenada (UCS) como el índice de soporte de California (CBR) aumentarán con el tiempo, lo que indica su idoneidad para carreteras rurales con menor necesidad de mantenimiento.

Los ensayos realizados indican que una menor densidad se correlaciona con una disminución en la expansión final. El polvo de horno de cemento (CKD) resultó ser el agente estabilizador más eficaz. Esto se debe a que el suelo puede intercambiar cationes de menor carga con los cationes de mayor carga del CKD, lo que ayuda a estabilizar el potencial expansivo. Una de las razones clave por las que el CKD superó a otros

materiales es su alto contenido en cemento y fósforo, aunque la dosificación de CKD fue del 10%, menor que la dosificación del MWP con el 12%.

Otro indicador de estabilizar la muestra implica reducir el contenido de humedad hacia el final de la prueba de expansión libre. Las muestras inalteradas mostraron un nivel máximo de humedad del 93,45%, mientras que la muestra de suelo con horno de cemento, el estabilizador más eficaz, alcanzó un máximo del 82,03%. Esto sugiere que la estabilización hace que el material absorba menos agua, reduciendo su expansión.

En el caso del CKD, la expansión en el ensayo de expansión libre fue cercana a 20, lo que coloca a este suelo en un rango expansivo "Muy Bajo", eliminando problemas para construcciones livianas. El CKD mostró varios efectos beneficiosos en las muestras de suelo estabilizadas, incluyendo una disminución significativa en el índice de plasticidad, el potencial de hinchamiento y el contenido óptimo de humedad. Además, se observó un alza en la relación de soporte de California, demostrando que este agente estabilizador mejora tanto las propiedades de compactación como la resistencia del suelo expansivo.

El MWP también arrojó resultados positivos, reduciendo el índice de hinchamiento libre y disminuyendo la capacidad de cambio de volumen del suelo. El polvo de mármol controla eficazmente la contracción en suelos expansivos y, al ser un producto de desecho, ofrece una opción ecológica para iniciativas sostenibles de mejora del suelo.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda extender la investigación a otras áreas de Cuenca y sus alrededores para tener una visión más amplia de la distribución y comportamiento de los suelos expansivos. Esto permitirá desarrollar estrategias de estabilización más específicas y efectivas para cada región.

Aunque el CKD y MWP han demostrado ser eficaces, es crucial investigar otros posibles aditivos estabilizantes que puedan ofrecer beneficios adicionales o ser más accesibles económicamente. Aditivos como cenizas volantes, fibras naturales o polímeros pueden ser explorados.

Se sugiere realizar estudios a largo plazo en condiciones de campo para evaluar la durabilidad y eficacia de los estabilizantes aplicados en diferentes escenarios climáticos y de carga. Esto permitirá validar los resultados de laboratorio y ajustar las metodologías de estabilización.

Una alternativa es implementar programas de capacitación para profesionales de la construcción y estudiantes de ingeniería civil sobre técnicas de estabilización de suelos expansivos. Esto asegurará la aplicación adecuada de los métodos y el uso eficiente de los recursos.

En las construcciones se debe establecer protocolos de monitoreo y mantenimiento regular de las infraestructuras construidas sobre suelos estabilizados. Esto ayudará a detectar y corregir problemas a tiempo, prolongando la vida útil de las estructuras.

Fomentando el uso de estabilizantes ecológicos como el polvo de mármol, que no solo mejoran las propiedades del suelo, sino que también ayudan a reducir el impacto ambiental al reutilizar productos de desecho industriales.

Se debería realizar investigaciones complementarias sobre la interacción de los estabilizantes con diferentes tipos de suelos y su impacto en las propiedades mecánicas y de resistencia del suelo. Esto ayudará a optimizar las mezclas de estabilización y su aplicación práctica.

La principal recomendación es evaluar el costo-beneficio de la estabilización de suelos y considerar el impacto social de estas intervenciones. Es esencial asegurar que las soluciones propuestas sean accesibles y beneficien a la comunidad local sin generar costos prohibitivos

7. REFERENCIAS

Almuaythir, S., & Abbas, M. F. (2023). Expansive soil remediation using cement kiln dust as stabilizer. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01983.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01983>

Alcaldía de Cuenca. (2017). Geoportal WEB. Recuperado de

<http://ide.cuenca.gob.ec/geoportal-web/viewer.jsf?map=5>

ASTM 4829. (2011). Standard Test Method for Expansion Index of Soils

ASTM D 422. (2007). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils

ASTM D 427. (2004). Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method

ASTM D 854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soils Solids by Water

Pycnomete

Bravo Heredia, P. E., & Daza Orellana, P. A. (2019). Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca. Recuperado de

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32443>

Braja M. DAS. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Cuarta)*. Mexico: Cengage Learning.

Basma, A.A. (1996). Prediction of expansion degree for natural compacted clays. *Geotech*.

Beltrán Martínez, R. (2009). *Diseño geotécnico y estructural de una cimentación en arcilla expansiva*. Mexico.

Delgado Trujillo, A. (1986). Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Recuperado de

<https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/24350>

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica (No. 624.13)*. Thomson Learning.

Florez-Gongora, C. H., Caicedo-Osorio, Z. K., Zárate-Caballero, R., & Contreras-Ortíz, B. A. (2016). Estabilización química de suelos expansivos de san José de cúcuta

(colombia) usando cenizas volantes. *Respuestas*, 13(2), 19-31.

<https://doi.org/10.22463/0122820X.536>

FRATELLI, M. (1993). Suelos, Fundaciones y Muros. Caracas: s.n.

GONZALES DE VALLEJO, L. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Prentice Hall.

Horpibulsuk, S., Rachan, R., Chinkulkijniwat, A., Raksachon, Y., & Suddeepong,

A. (2010). Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations. *Construction and building materials*, 24(10),

2011-2021

Idrovo Byron. (2019). Caracterización de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca.

Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32443>

JIMENEZ, J. (1975). Geotecnia y Cimientos (Segunda Edición), Tomo I y III. . Madrid: Editorial Rueda.

Kanagarathinam, L., Anburaja, D., Sudharson, G., Keerthana, P., & Karpoorajothi, S.

(2021). Soil Stabilization Techniques for Roads on Expansive Soils and Loose Sand.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1026(1), 012013.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1026/1/012013>

Malathi, N., Komala, D. N., Shabeena, S., & Jaya Saahithya, V. C. (2021). Stabilization of Expansive Soil by Using Lime and Reinforcement With Geo-Textile. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1112(1), 012023.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1112/1/012023>

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1112/1/012023>

Marín Nieto, L. (1991). Arcillas expansivas en Ecuador. Viña del Mar – Chile.

NTE INEN 0691. (1982). Determinación del límite líquido. Método de Casagrande

NTE INEN 0692. (1982). Determinación del límite plástico

NTE INEN 0696. (2011). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y

grueso

Petry, T. M., & Armstrong, J. C. (1989). Stabilization of expansive clay

soils. *Transportation Research Record*, (1219)

Pillalazo, J., & Morales, A. (2021). MAPA DE CUENCA POR TIPO DE SUELO Y SECTORES DE PLANEAMIENTO recuperado de

<http://dspace.ucacuenca.edu.ec/handle/123456789/7393>

Osman, K. T. (2018). Expansive Soils. En K. T. Osman, *Management of Soil Problems* (pp. 117-143). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75527-4_6

Shah, V., Wanare, R., K. R Iyer, K., & Rotte, V. M. (2023). Evaluation of the role of fibres and admixture(s) on sustainable crack reduction in expansive soil. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.501>

Sofwan, & Nurdin, S. (2020). Bearing Capacity Improvement of Expansive Soil: Stabilization with Cement and Iron Oxide Additive. *MATEC Web of Conferences*, 331, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202033102005>

Sudheer Kumar, J., & Janewoo, U. (2016). Stabilization of Expansive Soil with Cement Kiln Dust and RBI Grade 81 at Subgrade Level. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(4), 1037-1046. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0024-8>

Suwantara, I. K., Wardani, S. P. R., & Priastiwi, Y. A. (2019). Expansive Clay Soil Stabilization Using White Soil Material and Sulfuric Acid Solution (H_2SO_4) For Subgrade in Godong Area—Grobogan District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 328(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/328/1/012022>

Sandoval, C. H. H., Cristancho, J.C.G., & Naranjo, O. E. P. (2012).

Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Facultad de Ingeniería*, 21(32), 21-40

Vikas, K., & Ramana, G. V. (2023). Viability of bulk utilization of granite sludge powder (GSP) to enhance the geotechnical behavior of expansive soil. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.574>

Vélez, P. (2012). Comprobación de las correlaciones de la presión de expansión con las propiedades índices en suelos del sector Challuabamba, Cuenca,

recomendaciones para la construcción de cimentaciones. Recuperado de

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2558>

Zada, U., Jamal, A., Iqbal, M., Eldin, S. M., Almoshaogeh, M., Bekkouche, S. R., & Almuaythir, S. (2023). Recent advances in expansive soil stabilization using admixtures: Current challenges and opportunities. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01985. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01985>

8. ANEXOS

Anexo 1

Granulometría por lavado y Límites de Atterberg

LABORATORIO DE SUELOS						
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						1/2
Proyecto: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba						
						Calculado: Ing. Cristina Vintimilla
						Procedencia: Miraflores
Pozo: 1						
Profundidad: 0.60 m						Fecha: 23 de enero de 2024
NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63						
TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA	
3"	76.200	-	-	-	100.0	
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0	
2"	50.800	-	-	-	100.0	
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0	
1"	25.400	-	-	-	100.0	
3/4 "	19.050	-	-	-	100.0	
1/2 "	12.700	-	-	-	100.0	
3/8 "	9.525	-	-	-	100.0	
Nº 4	4.750	-	-	-	100.0	
< Nº 4	4.750	-	500	(100.0)	100.0	
Nº 10	2.000	16.3	16.3	3.3	96.7	
Nº 40	0.425	33.0	49.3	9.9	90.1	
Nº 200	0.075	24.9	74.2	14.8	(85.2)	
< Nº 200	<0,075	425.5	425.8	(85.2)		
* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8.						
PESO TOTAL DE LA MUESTRA			500.00	CUARTEO		
CLASIFICACIÓN		GRAVA =	0.00%	Peso total antes del lavado		500.00
SUCS	CH	ARENA =	15.00%	Peso total después del lavado		74.21
AASHTO	A-7-6 (39)	FINOS =	85.00%			
OBSERVACIONES: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad						
CURVA GRANULOMÉTRICA						
<p>Porcentaje que Pasa</p> <p>Abertura del Tamiz (mm)</p>						

LABORATORIO DE SUELOS

2/2

Proyecto: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Chaliuabamba

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla

Pozo: 1

Procedencia: Miraflores

Profundidad: 0.60 m

Fecha: 23 de enero de 2024

HUMEDAD NATURAL

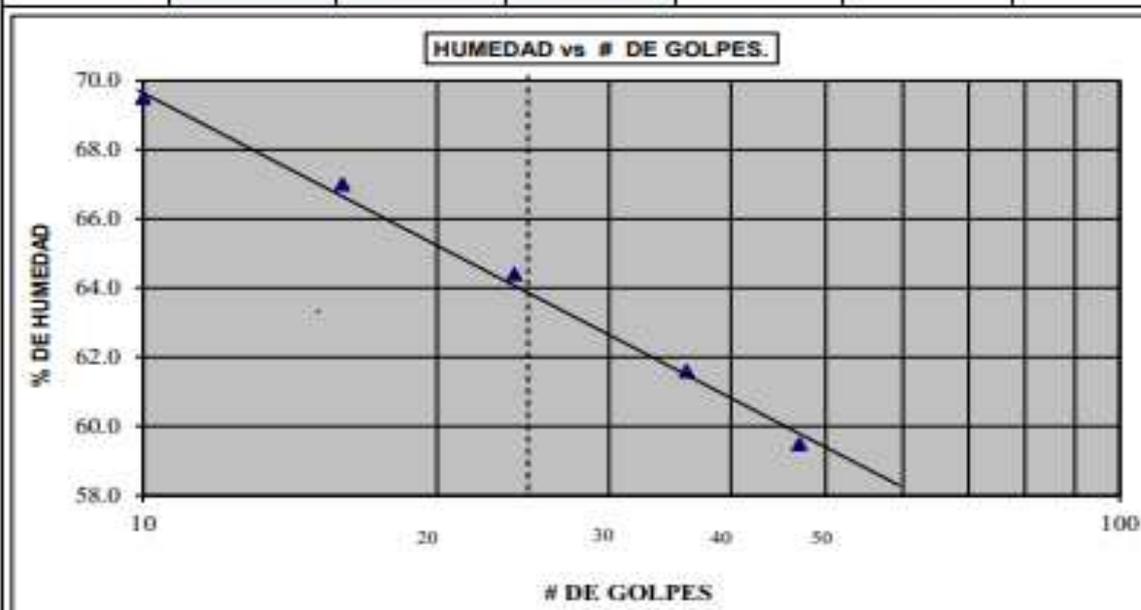
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
57	---	40.40	34.66	17.40	33.26	32.88
59	---	40.21	34.60	17.45	32.71	
53	---	40.04	34.56	17.78	32.66	

LIMITE LIQUIDO

54	10	22.95	20.74	17.56	69.50	63.87
4	16	23.72	21.06	17.09	67.00	
64	24	23.60	21.14	17.32	64.40	
17	36	24.62	21.99	17.72	61.59	
18	47	24.37	21.8	17.48	59.49	

LIMITE PLASTICO

12	---	18.80	18.46	16.86	21.25	21.71
3	---	19.32	18.95	17.23	21.51	
19	---	18.66	18.30	16.69	22.36	



Límite Líquido a 25 golpes = 63.87% Índice de plasticidad = 42.16



MARIBEL CRISTINA
VINTIMILLA AVILA

ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENESCYT 1007-05-605320

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

1/2

Proyecto: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Chaliuabamba

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla

Pozo: 1

Procedencia: Chaliuabamba

Profundidad: 0.60 m

Fecha: 22 de enero de 2024

NORMAS: AASHTO T-11 T-27

ASTM: D422-63

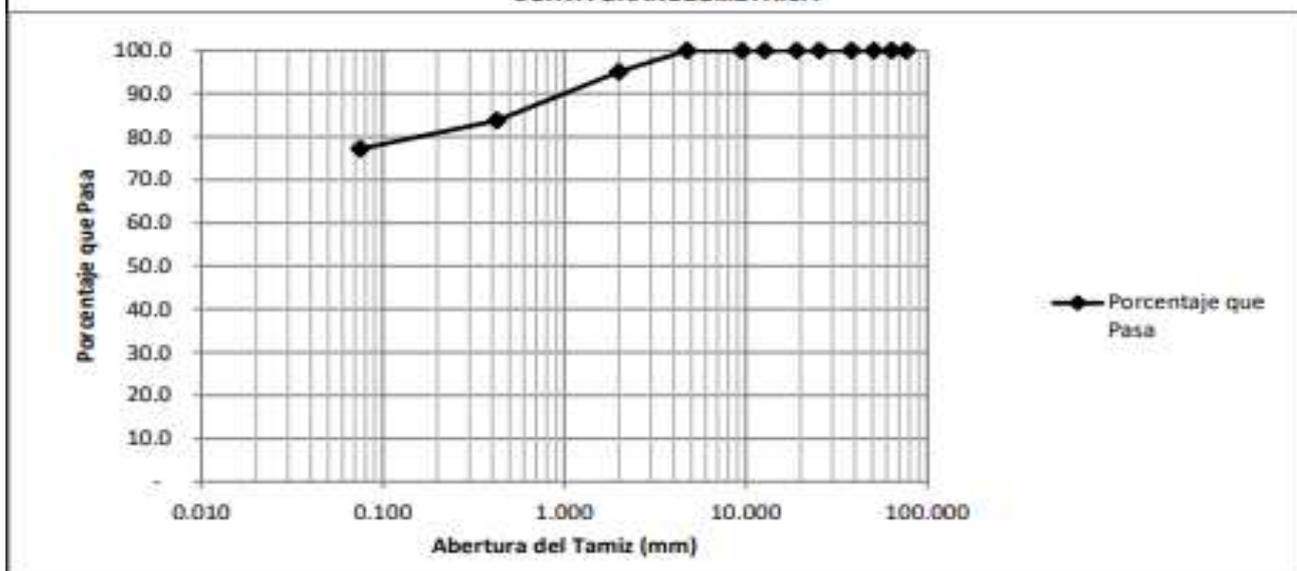
TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA
3"	76.200	-	-	-	100.0
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0
2"	50.800	-	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	-	100.0
3/4 "	19.050	-	-	-	100.0
1/2 "	12.700	-	-	-	100.0
3/8 "	9.525	-	-	-	100.0
Nº 4	4.750	-	-	-	100.0
< Nº 4	4.750	-	500	(100.0)	100.0
Nº 10	2.000	24.6	24.6	4.9	95.1
Nº 40	0.425	56.7	81.3	16.3	83.7
Nº 200	0.075	32.8	114.1	22.8	(77.2)
< Nº 200	<0.075	385.7	385.9	(77.2)	

* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8.

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN		GRAVA = 0.00%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS	CH	ARENA = 23.00%	Peso total después del lavado	114.14
AASHTO	A-7-5 (35)	FINOS = 77.00%		

OBSERVACIONES: Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad

CURVA GRANULOMÉTRICA



LABORATORIO DE SUELOS

2/2

Proyecto: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Chaliuabamba

0 0

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla

Procedencia: Chaliuabamba

Pozo: 1

Profundidad: 0.60 m

Fecha: 22 de enero de 2024

HUMEDAD NATURAL

N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
47	---	39.97	34.00	17.51	36.20	36.06
9	---	40.10	33.83	16.70	36.60	
5	---	39.79	33.81	16.91	35.38	

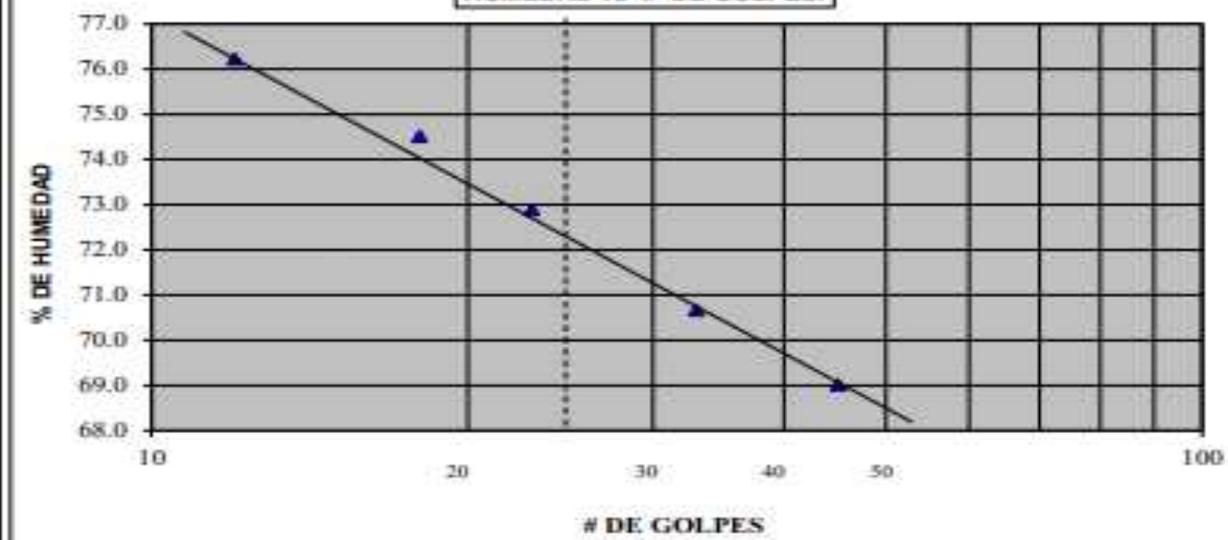
LIMITE LIQUIDO

58	12	22.91	20.57	17.50	76.22	72.35
2	18	23.94	20.87	16.75	74.51	
55	23	23.66	21.24	17.92	72.89	
52	33	24.97	21.91	17.58	70.67	
61	45	24.47	21.73	17.76	69.02	

LIMITE PLASTICO

49	---	19.10	18.71	17.44	30.71	30.97
6	---	18.46	18.07	16.81	30.95	
13	---	19.03	18.63	17.35	31.25	

HUMEDAD vs # DE GOLPES.



Límite Líquido a 25 golpes =

72.35%

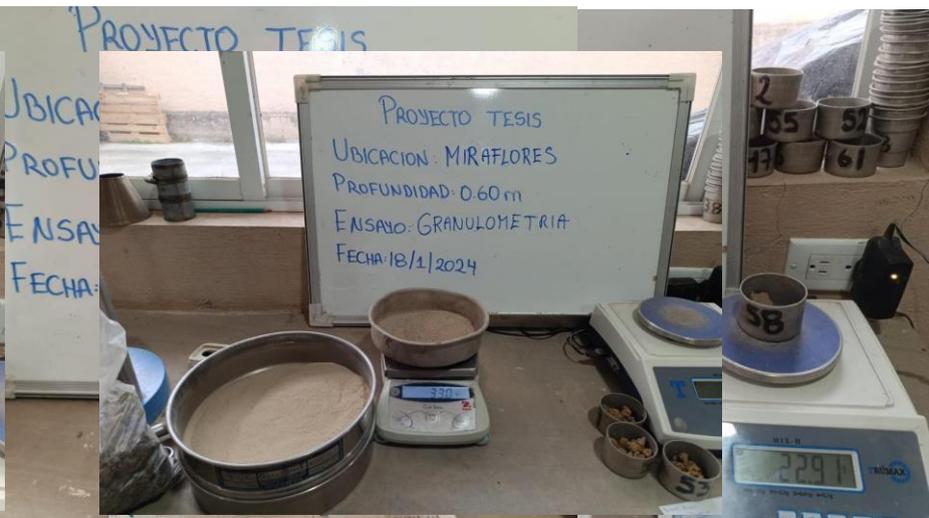
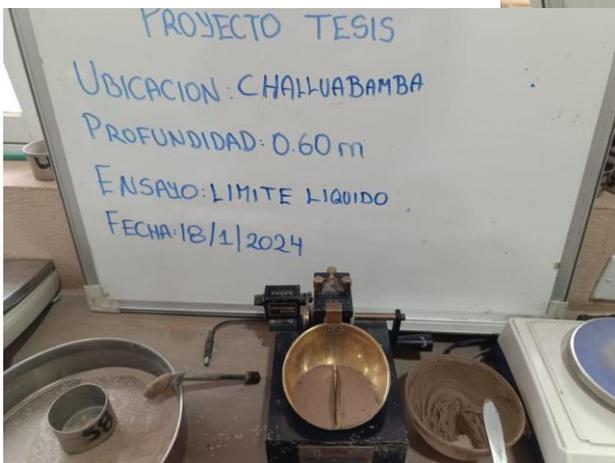
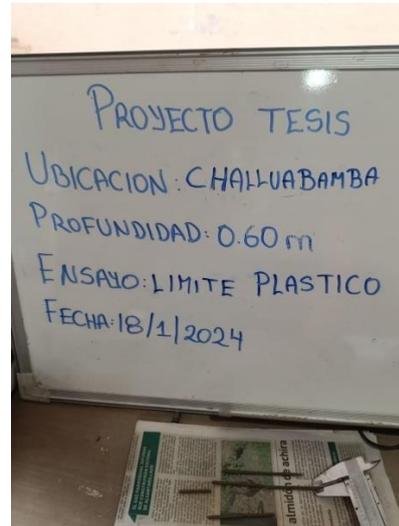
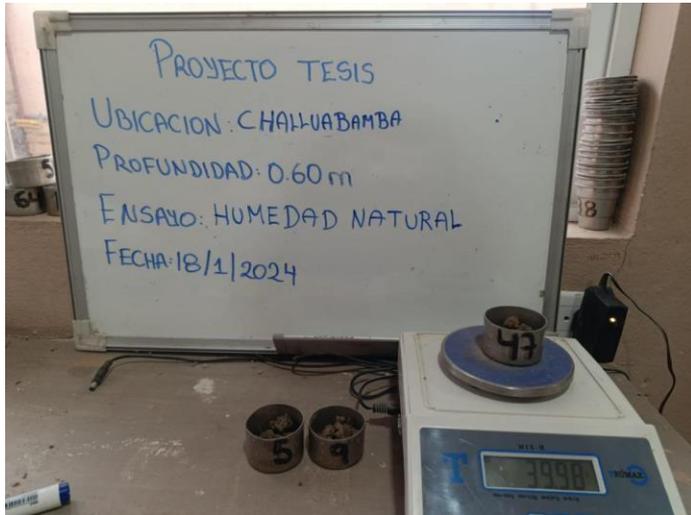
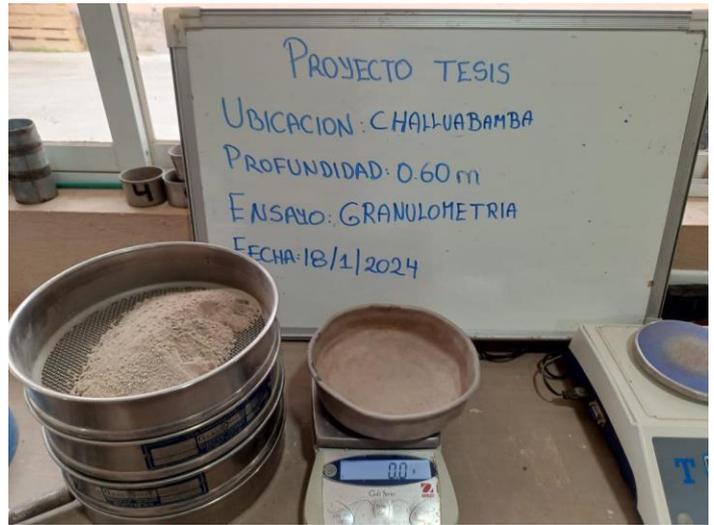
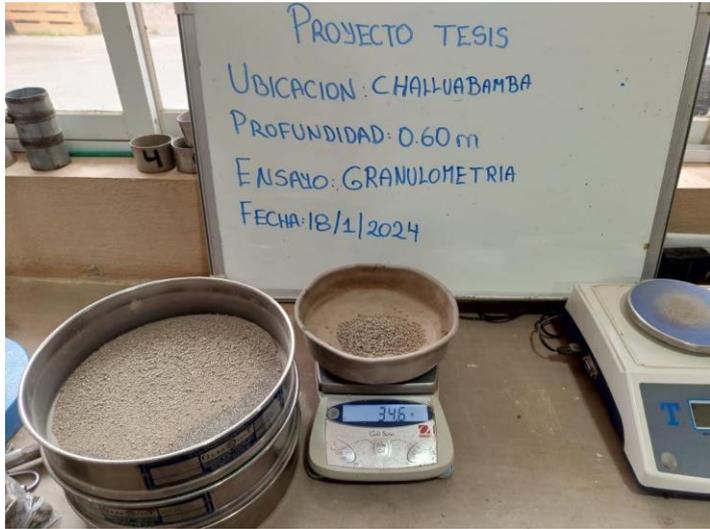
Índice de plasticidad =

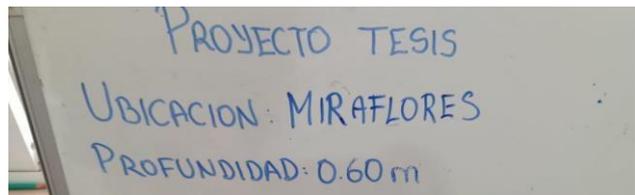
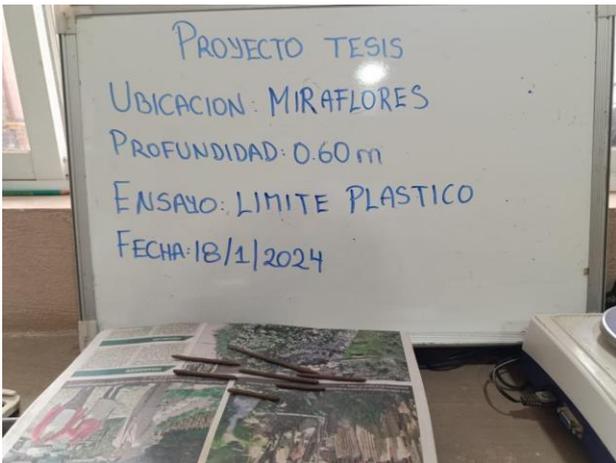
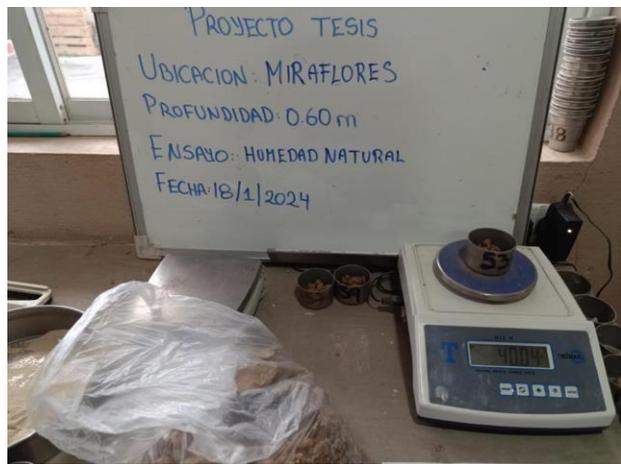
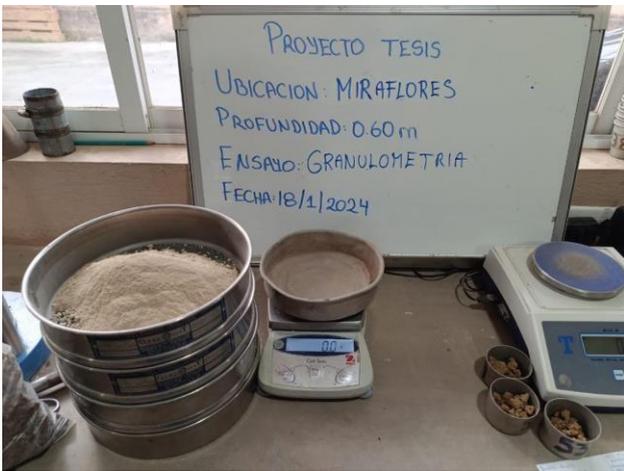
41.38

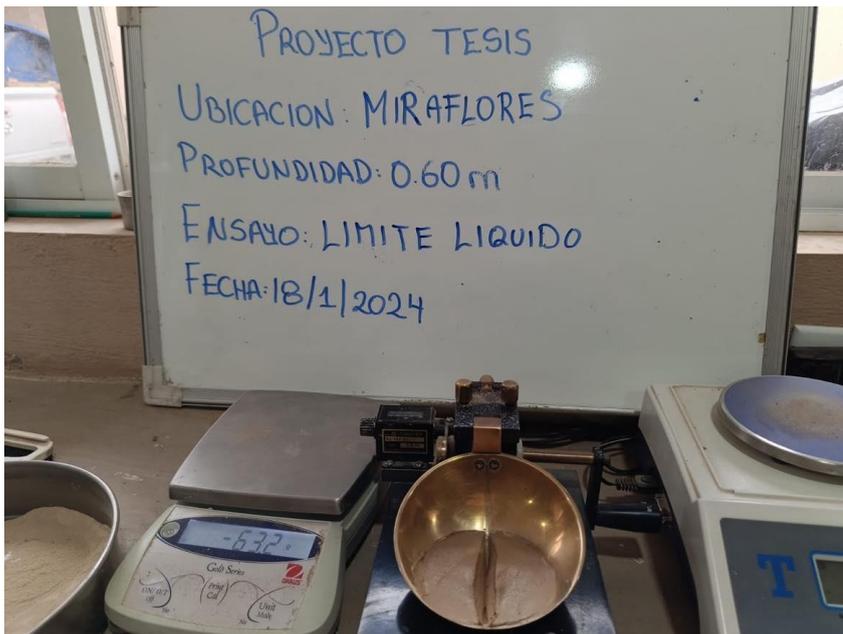


MARIBEL CRISTINA
VINTIMILLA AVILA

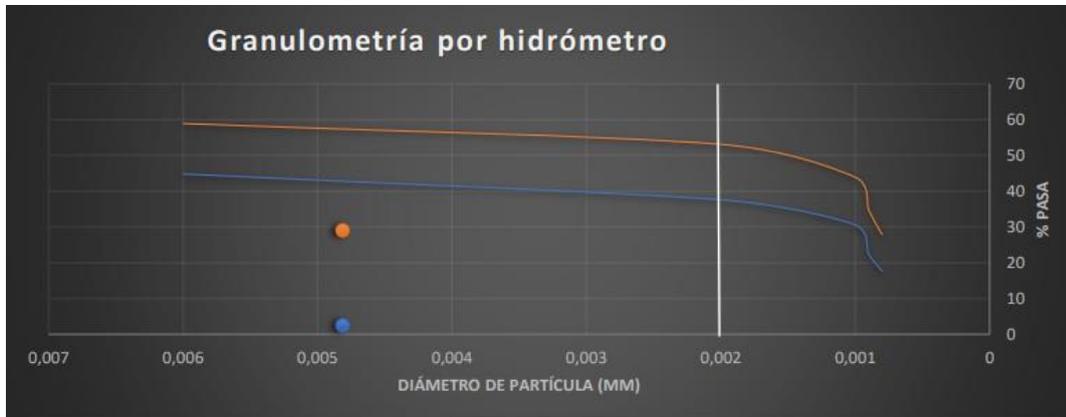
ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENECYT 1007-05-605320



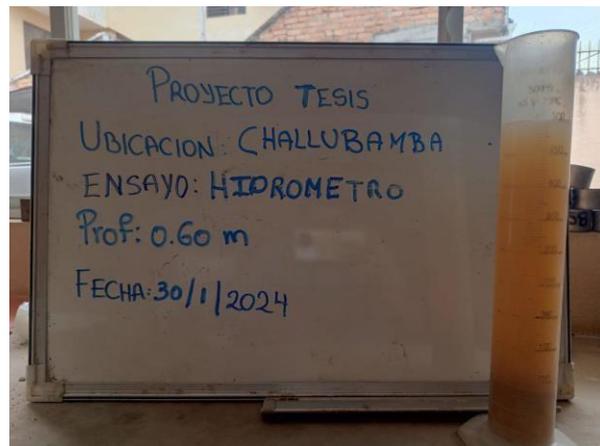
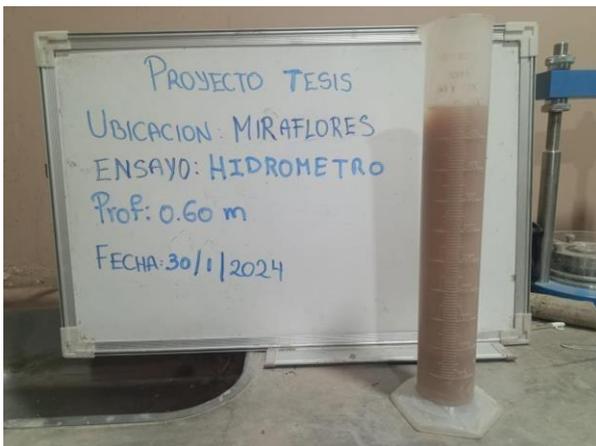




Ensayo Hidrómetro



Tiempo (min)	Temperatura C	Diametro (mm)	% Pasa (Challuabamba)	% Pasa (Miraflores)
1	21	0,075	85,2	77,2
3	21	0,038	77,3	73,5
6	21	0,02	72,8	70,5
10	21	0,015	67,6	67,8
15	21	0,01	60,2	64,8
25	21	0,008	52,8	61,3
40	21	0,006	44,8	58,9
70	21	0,002	37,6	53,1
80	21	0,001	30,6	43,9
90	21	0,0009	22,5	34,8
110	21	0,0008	17,7	27,9



Ensayos de Expansividad en muestras Naturales

LABORATORIO DE SUELOS																																																											
ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D 4546)																																																											
PROYECTO:		Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba																																																									
UBICACIÓN:		Challuabamba																																																									
PERFORACIÓN:		C-1	PROFUNDIDAD: 0.6m																																																								
FECHA:		23/1/2024																																																									
EXPANSION LIBRE																																																											
DATOS DEL MOLDE			CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN																																																								
Diámetro del molde	$\phi =$	6.16 cm	W molde	Wm= 41.56 g																																																							
Altura del molde	h =	2.01 cm	W molde + muestra	Wm+s= 127.3 g																																																							
Área	A =	29.80 cm ²	W húmedo muestra	Ws= 85.74 g																																																							
Volumen	v =	59.90 cm ³	Densidad húmeda	Yh= 1.38 g/cm ³																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Humedad Inicial</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">Humedad Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Recipiente</td> <td style="text-align: center;">41,56</td> <td>Recipiente</td> <td style="text-align: center;">41,56</td> </tr> <tr> <td>Rec+anillo humedo</td> <td style="text-align: center;">127,3</td> <td>Rec+anillo humedo</td> <td style="text-align: center;">140,26</td> </tr> <tr> <td>Rec+Anillo seco</td> <td style="text-align: center;">85,74</td> <td>Rec+Anillo seco</td> <td style="text-align: center;">98,7</td> </tr> <tr> <td>humedad %</td> <td style="text-align: center;">19,83</td> <td>humedad %</td> <td style="text-align: center;">24,28</td> </tr> </tbody> </table>					Humedad Inicial		Humedad Final		Recipiente	41,56	Recipiente	41,56	Rec+anillo humedo	127,3	Rec+anillo humedo	140,26	Rec+Anillo seco	85,74	Rec+Anillo seco	98,7	humedad %	19,83	humedad %	24,28																																			
Humedad Inicial		Humedad Final																																																									
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56																																																								
Rec+anillo humedo	127,3	Rec+anillo humedo	140,26																																																								
Rec+Anillo seco	85,74	Rec+Anillo seco	98,7																																																								
humedad %	19,83	humedad %	24,28																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>DIA</th> <th>HORA</th> <th>MINUTOS</th> <th>ΔH</th> <th>% DE EXPANSION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>10:30</td><td>0</td><td>0,076</td><td>4,00</td></tr> <tr><td>1</td><td>10:36</td><td>6</td><td>0,152</td><td>8,00</td></tr> <tr><td>1</td><td>10:39</td><td>9</td><td>0,171</td><td>9,00</td></tr> <tr><td>1</td><td>12:40</td><td>70</td><td>0,2</td><td>10,53</td></tr> <tr><td>1</td><td>15:00</td><td>270</td><td>0,209</td><td>11,00</td></tr> <tr><td>2</td><td>10:40</td><td>1458</td><td>0,79</td><td>41,58</td></tr> <tr><td>2</td><td>12:30</td><td>1562</td><td>0,798</td><td>42,00</td></tr> <tr><td>2</td><td>14:30</td><td>1712</td><td>0,836</td><td>44,00</td></tr> <tr><td>3</td><td>12:30</td><td>3004</td><td>0,9006</td><td>47,40</td></tr> <tr><td>3</td><td>15:00</td><td>3154</td><td>1,0222</td><td>53,80</td></tr> </tbody> </table>					DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION	1	10:30	0	0,076	4,00	1	10:36	6	0,152	8,00	1	10:39	9	0,171	9,00	1	12:40	70	0,2	10,53	1	15:00	270	0,209	11,00	2	10:40	1458	0,79	41,58	2	12:30	1562	0,798	42,00	2	14:30	1712	0,836	44,00	3	12:30	3004	0,9006	47,40	3	15:00	3154	1,0222	53,80
DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION																																																							
1	10:30	0	0,076	4,00																																																							
1	10:36	6	0,152	8,00																																																							
1	10:39	9	0,171	9,00																																																							
1	12:40	70	0,2	10,53																																																							
1	15:00	270	0,209	11,00																																																							
2	10:40	1458	0,79	41,58																																																							
2	12:30	1562	0,798	42,00																																																							
2	14:30	1712	0,836	44,00																																																							
3	12:30	3004	0,9006	47,40																																																							
3	15:00	3154	1,0222	53,80																																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Longitud Inicial(cm)</th> <th>Longitud Final(cm)</th> <th>% de Expansion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1,9</td> <td style="text-align: center;">2,922</td> <td style="text-align: center;">53,80</td> </tr> </tbody> </table>					Longitud Inicial(cm)	Longitud Final(cm)	% de Expansion	1,9	2,922	53,80																																																	
Longitud Inicial(cm)	Longitud Final(cm)	% de Expansion																																																									
1,9	2,922	53,80																																																									

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D 4546)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba**UBICACIÓN:** Miraflores**PERFORACIÓN:** C-1**PROFUNDIDAD:** 0.6m**FECHA:** 23/1/2024**EXPANSION LIBRE**

DATOS DEL MOLDE				CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN			
Diámetro del molde	$\phi =$	6.16	cm	W molde	Wm=	41.56	g
Altura del molde	h =	2.01	cm	W molde + muestra	Wm+s=	127.3	g
Área	A =	29.80	cm ²	W húmedo muestra	Ws=	87.3	g
Volumen	V =	59.90	cm ³	Densidad húmeda	$\gamma_h =$	1.64	g/cm ³

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	127,3	Rec+anillo humedo	130,2
Rec+Anillo seco	87,3	Rec+Anillo seco	91,7
humedad %	22,91	humedad %	30,43

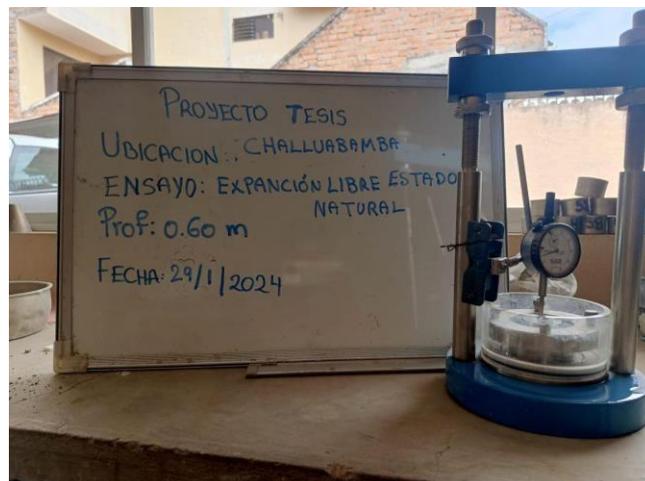
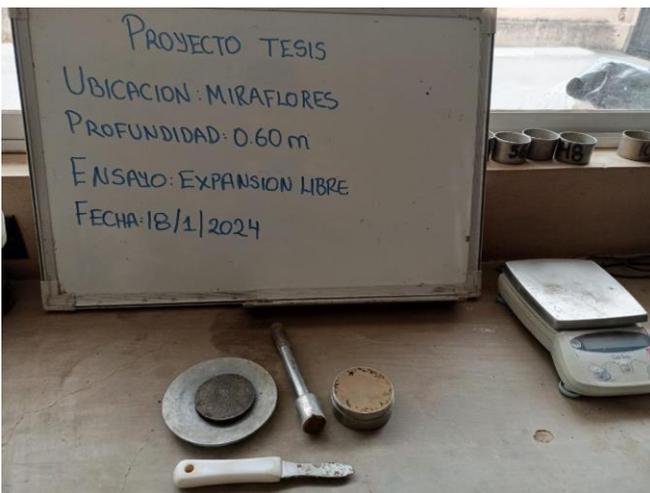
DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,133	7,00
1	10:36	6	0,152	8,00
1	10:39	9	0,171	9,00
1	12:40	70	0,209	11,00
1	15:00	270	0,209	11,00
2	10:40	1458	0,798	42,00
2	12:30	1562	0,798	42,00
2	14:30	1712	0,9006	47,40
3	12:30	3004	0,988	52,00
3	15:00	3154	1,5599	82,10

Longitud Inicial(cm)	Longitud Final(cm)	% de Expansion
1,9	3,460	82,10



FIRMADO ELECTRÓNICAMENTE POR:
MARIBEL CRISTINA
VINTIMILLA AVILA

ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENECYT 1007-05-605320



LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (ASTM D 4546)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

UBICACIÓN:
MIRAFLORES

PERFORACIÓN: C-1
FECHA: 27/1/2024

PROFUNDIDAD: 0.6m

PRESION DE EXPANSION

DATOS DEL MOLDE				CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN			
Diámetro del molde	∅ =	6.16	cm	W molde	Wm=	41.56	g
Altura del molde	h =	2.01	cm	W molde + muestra	Wm+s=	119.7	g
Área	A =	29.80	cm ²	W húmedo muestra	Ws=	78.14	g
Volumen	V =	59.90	cm ³	Densidad húmeda	Yh=	1.39	g/cm ³

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	119,7	Rec+anillo humedo	130,2
Rec+Anillo seco	78,14	Rec+Anillo seco	91,7
humedad %	24,83	humedad %	27,15

HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
14:00	0	0	0	0,0
15:00	60	120	120	38,16
16:00	120	10	130	41,34
17:00	180	20	150	47,69
9:00	1140	100	250	79,49
13:00	1380	20	270	85,85
15:00	1500	-20	250	79,49
18:00	1680	-10	240	76,31
9:00	2580	0	240	76,31
12:00	2760	0	240	76,31

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (ASTM D 4546)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba**UBICACIÓN:**

Challuabamba

PERFORACIÓN:

C-1

PROFUNDIDAD:

0.6m

FECHA:

27/1/2024

PRESION DE EXPANSION

DATOS DEL MOLDE				CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN			
Diámetro del molde	$\phi =$	6.16	cm	W molde	Wm=	41.56	g
Altura del molde	h =	2.01	cm	W molde + muestra	Wm+s=	115.2	g
Área	A =	29.80	cm ²	W húmedo muestra	Ws=	73.64	g
Volumen	V =	59.90	cm ³	Densidad húmeda	$\gamma_h =$	1.48	g/cm ³

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	115,2	Rec+anillo humedo	140,269
Rec+Anillo seco	73,64	Rec+Anillo seco	98,709
humedad %	23,36	humedad %	25,60

DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	100	100	31,80
1	16:00	120	10	110	34,98
1	17:00	180	20	130	41,34
2	9:00	1140	100	230	73,13
2	13:00	1380	20	250	79,49
2	15:00	1500	-20	230	73,13
2	18:00	1680	-10	220	69,95
3	9:00	2580	0	220	69,95
3	12:00	2760	0	220	69,95



Ensayo de Proctor Modificado y CBR en Muestras Naturales

LABORATORIO DE SUELOS			
ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)			
PROYECTO:	Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba		
SECTOR:	Challuabamba	CLASE DE SUELOS:	Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad
POZO N°:	1	FECHA:	27 de enero de 2024
		REALIZADO POR:	Ing. Cristina Vintimilla
ASSHTO T180-70(modificado)			

MOLDE N1		
PESO	5633	gramos
VOLUMEN	2,105	cm ³
DIAMETRO	15	cm

NUMERO DE CAPAS:5	
# GOLPES POR CAPA:56	
PESO MARTILLO:4,55 kilos	
ALTURA CAIDA MARTILLO	

DENSIDAD				
PESO SUELO + MOLDE	8643,38	9210,53	9686,93	9605,26
DENSIDAD HUMEDA	1,43	1,7	1,926	1,887
DENSIDAD SECA	1,45	1,55	1,62	1,49

% DE HUMEDAD								
TARRO N°	13	49	8	45	6	11	20	5
PESO HUMEDO +TARRO	41,16	42,18	45,43	44,54	43,23	44,98	41,23	41,75
PESO SECO +TARRO	40,74	41,88	43,1	42,23	39	40,54	36,5	36,85
PESO TARRO	17,35	17,44	16,6	17,52	16,81	16,92	16,77	16,91
% DE HUMEDAD	1,5	1,4	8,9	9,5	18,5	17,4	23,45	24,65
PROMEDIO % HUMEDAD	1,6		9,2		18,9		26	

Relacion humedad-Densidad

% de Humedades	Densidad Seca (g/cm ³)
1,5	1,45
1,4	1,55
8,9	1,62
9,5	1,49

MAXIMA DENSIDAD SECA	1,62	g/cm ³
% OPTIMO DE HUMEDAD	16,7	

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba
SECTOR: Challuabamba **CLASE DE SUELOS:** Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad
POZO N°: 1 **FECHA:** 27 de Enero de 2024
DISTURBADA: No **REALIZADO POR:** Ing. Cristina Vintimilla

DENSIDAD PESO DEL MARTILLO: 4.55 kilos ALTURA DE CAÍDA : 45,72 cm.

Molde No.	1		2		3	
Numero de capas	5		5		5	
# de golpes por capa	56		25		10	
	ANTES DEL REMOJO	DESPUES DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUES DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUES DEL REMOJO
Peso muestra+molde Gr.	9918	10285	10104	10558	10301	10840
Peso molde Gr.	5876	5876	6232	6232	6711	6711
Peso muestra Gr.	4042	4409	3872	4326	3590	4129
Volumen muestra cm ³ .	2068	2068	2085	2085	2068	2068
Densidad húmeda kg/M ³ .	1,955	2,132	1,857	2,075	1,736	1,997
Densidad seca kg/M ³ .	1,668	1,638	1,581	1,557	1,477	1,455

CONTENIDO DE AGUA ANTES DEL ENSAYO

Tarro No.	61	56	12	19	51	64
Peso húmedo + tarro (gr.)	49,16	51,87	51,03	52,78	49,72	46,85
Peso seco + tarro (gr.)	44,39	47,02	46,01	47,35	44,95	42,39
Peso tarro (gr.)	17,76	17,59	16,86	16,69	17,47	17,32
Contenido de humedad %	17,91	16,48	17,22	17,71	17,36	17,79
Promedio humedad %	16,9		17,3		17,4	

CONTENIDO DE AGUA DESPUES DEL ENSAYO

Tarro No.	13	59	60	54	49	10
Peso húmedo + tarro (gr.)	41,89	41,7	37,68	36,66	42,04	37,87
Peso seco + tarro (gr.)	36,27	36,01	32,64	31,84	35,35	32,11
Peso tarro (gr.)	17,35	17,45	17,24	17,56	17,44	16,63
Contenido de humedad %	29,7	30,66	32,73	33,75	37,35	37,21
Promedio humedad %	30,4		32,9		35,7	
Agua absorbida %	16,9		22,7		25,8	

OBSERVACIONES:

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

SECTOR: challuabamba

FECHA:

7 de febrero de 2024

POZO N°: 1

REALIZADO POR:

Ing. Cristina Vintimilla

molde 1			expansión 0,08			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRIGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dal	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0			
0,5	25	49	10,4			
1	50	75	30,7			
1,5	75	99	50,7			
2	100	118	75,7	70	1000	7
3	150	144	100,6			
4	200	161	115,7			
5	250	180	131,8			
6	300	196	142,6			
8	400	220	152,3			
10	500	233	164,5			

molde 2			expansión 0,13			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRIGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dal	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0			
0,5	25	30	4,65			
1	50	49	10,7			
1,5	75	70	14,7			
2	100	81	20,5	34	1000	3,4
3	150	101	29,45			
4	200	115	39,5			
5	250	132	49,3			
6	300	142	59,7			
8	400	167	69,7			
10	500	185	79,9			

molde 3			expansión 0,15			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRIGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dal	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0			
0,5	25	15	2,6			
1	50	22	4,7			
1,5	75	36	7,2			
2	100	47	12,3	18	1000	1,8
3	150	58	17,5			
4	200	68	22,4			
5	250	78	28,8			
6	300	90	32,5			
8	400	104	38,2			
10	500	115	42,3			



LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

UBICACIÓN: Miraflores

FECHA: 25 de enero de 2024

POZO N°. 1

REALIZADO POR: Ing. Cristina Vintimilla

ASSHTO T180-70(modificado)

MOLDE N° 1	
PESO	5633 gramos
VOLUMEN	2,105 cm ³ .
DIÁMETRO	15 cm.

NUMERO DE CAPAS : 5
NUMERO DE GOLPES POR CAPA: 56
PESO DEL MARTILLO : 4,55 Kilos.
ALTURA DE CAÍDA DEL MARTILLO: 45,72 cm.

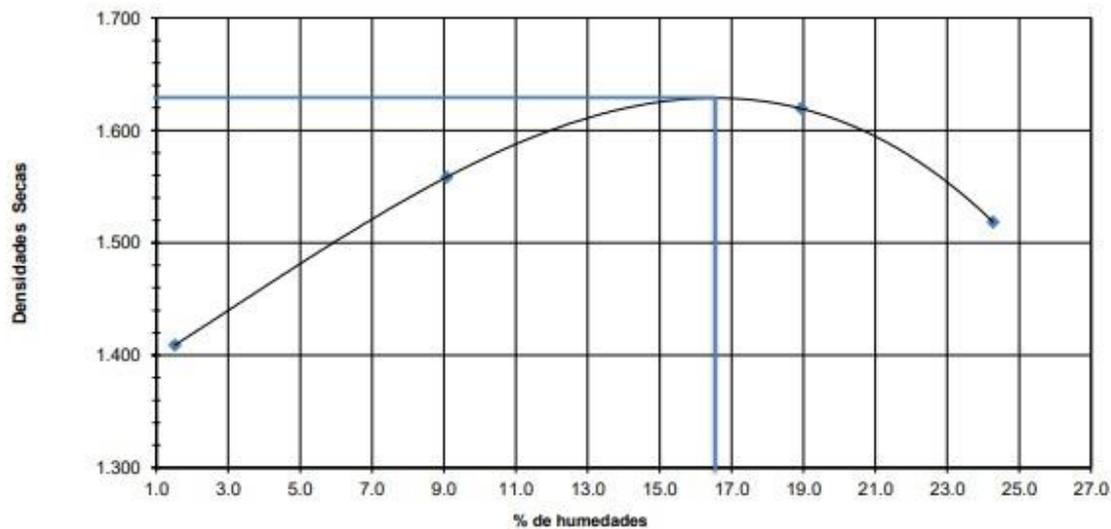
DENSIDAD

MUESTRA N°	1	2	3	4
PESO SUELO + MOLDE	8643.38	9210.53	9686.93	9605.26
DENSIDAD HÚMEDA	1.430	1.700	1.926	1.887
DENSIDAD SECA	1.409	1.558	1.619	1.519

% DE HUMEDAD

TARRO N°	13	49	8	45	6	11	20	5
PESO HÚMEDO +TARRO	41.16	42.18	45.43	44.54	43.23	44.98	41.23	41.75
PESO SECO +TARRO	40.74	41.88	43.10	42.23	39.00	40.54	38.50	36.85
PESO TARRO	17.35	17.44	16.60	17.52	16.81	16.92	16.77	16.91
% DE HUMEDAD	1.80	1.23	8.79	9.35	19.06	18.80	23.97	24.57
PROMEDIO % HUMEDAD	1.51		9.07		18.93		24.27	

Relación Humedad Densidad



MÁXIMA DENSIDAD SECA 1.630 g/cm³
% OPTIMO DE HUMEDAD 16.60%

OBSERVACIONES.



Creado: 2024-01-25 10:00:00 por:
MARIBEL CRISTINA VINTIMILLA AVILA

ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENECYT 1007-05-605320

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

SECTOR: Miraflores **CLASE DE SUELOS:** Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad

POZO N°: 1 **FECHA:** 29 de enero de 2024

DISTURBADA: No **REALIZADO POR:** Ing. Cristina Vintimilla

DENSIDAD

PESO DEL MARTILLO: 4.55 kilos ALTURA DE CAÍDA : 45,72 cm.

Molde No.	1		2		3	
Numero de capas	5		5		5	
# de golpes por capa	56		25		10	
	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO
Peso muestra+molde Gr.	9918	10285	10104	10558	10301	10840
Peso molde Gr.	5876	5876	6232	6232	6711	6711
Peso muestra Gr.	4042	4409	3872	4326	3590	4129
Volumen muestra cm³.	2068	2068	2085	2085	2068	2068
Densidad húmeda kg/M³.	1.955	2.132	1.857	2.075	1.736	1.997
Densidad seca kg/M³.	1.668	1.638	1.581	1.557	1.477	1.455

CONTENIDO DE AGUA ANTES DEL ENSAYO

Tarro No.	61	56	12	19	51	64
Peso húmedo + tarro (gr.)	49.16	51.87	51.03	52.78	49.72	46.85
Peso seco + tarro (gr.)	44.39	47.02	46.01	47.35	44.95	42.39
Peso tarro (gr.)	17.76	17.59	16.86	16.69	17.47	17.32
Contenido de humedad %	17.91	16.48	17.22	17.71	17.36	17.79
Promedio humedad %	17.20		17.47		17.57	

CONTENIDO DE AGUA DESPUES DEL ENSAYO

Tarro No.	13	59	60	54	49	10
Peso húmedo + tarro (gr.)	41.89	41.70	37.68	36.66	42.04	37.87
Peso seco + tarro (gr.)	36.27	36.01	32.64	31.84	35.35	32.11
Peso tarro (gr.)	17.35	17.45	17.24	17.56	17.44	16.63
Contenido de humedad %	29.70	30.66	32.73	33.75	37.35	37.21
Promedio humedad %	30.18		33.24		37.28	
Agua absorbida %	9.08		11.73		15.01	

OBSERVACIONES:

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

SECTOR: Miraflores

FECHA:

29 de enero de 2024

POZO N°: 1

REALIZADO POR:

Ing. Cristina Vintimilla

molde 1			expansión 8 %			
TIEMPO	PENETRA CION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0.0			
0.5	25	49	15.6			
1	50	75	23.9			
1.5	75	99	31.5			
2	100	118	37.6	37.6	1000	3.8
3	150	144	45.8			
4	200	161	51.3			
5	250	180	57.3			
6	300	196	62.4			
8	400	220	70.0			
10	500	233	74.17			

molde 2			expansión 13 %			
TIEMPO	PENETRA CION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0.0			
0.5	25	30	9.6			
1	50	49	15.6			
1.5	75	70	22.3			
2	100	81	25.8	25.8	1000	2.6
3	150	101	32.2			
4	200	115	36.6			
5	250	132	42.0			
6	300	142	45.2			
8	400	167	53.2			
10	500	185	58.89			

molde 3			expansión 15 %			
TIEMPO	PENETRA CION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dial	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0.0			
0.5	25	15	4.8			
1	50	22	7.0			
1.5	75	36	11.5			
2	100	47	15.0	15.0	1000	1.5
3	150	56	17.8			
4	200	68	21.7			
5	250	78	24.8			
6	300	90	28.7			
8	400	104	33.1			
10	500	115	36.61			

2/3

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR (ASTM D1883-73)

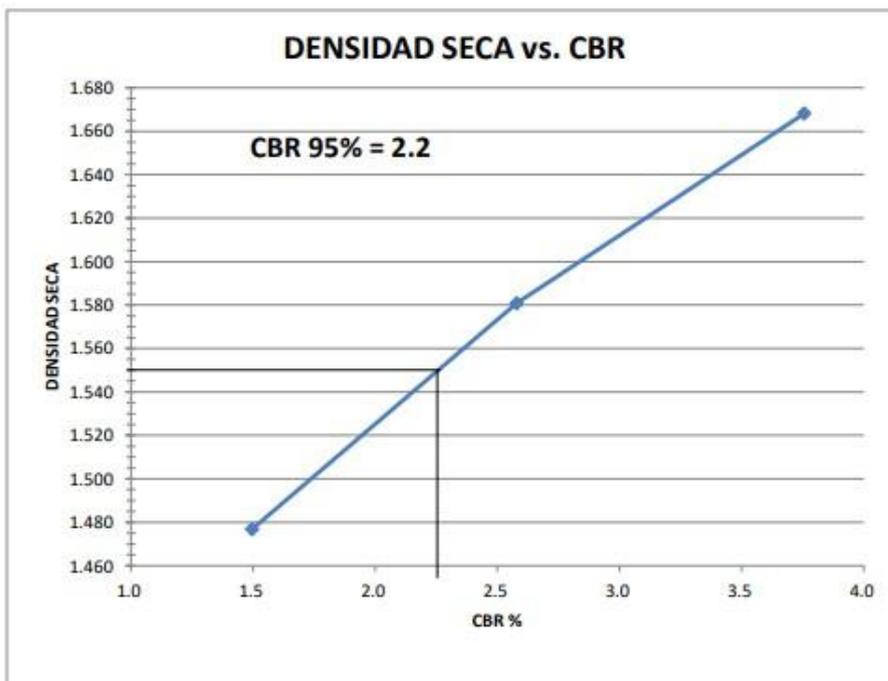
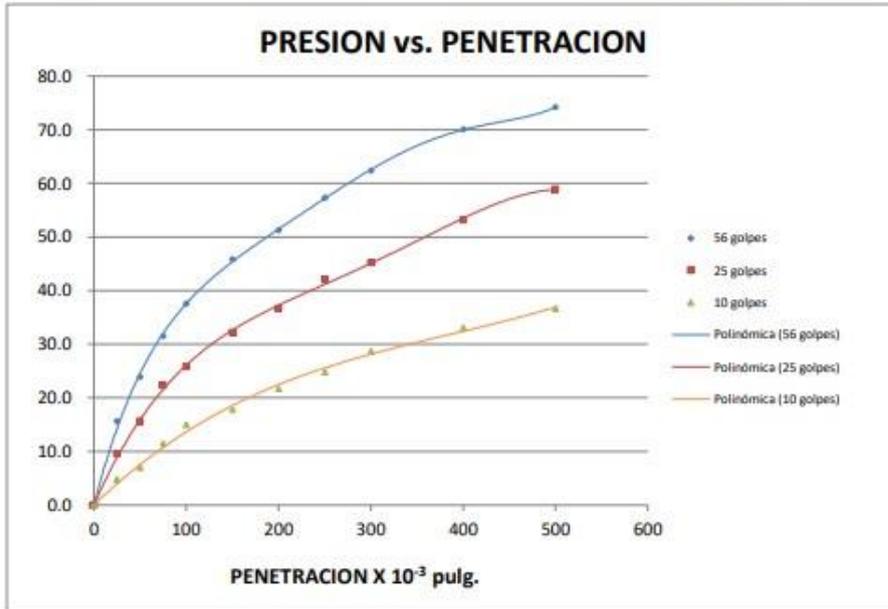
PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

SECTOR: Miraflores

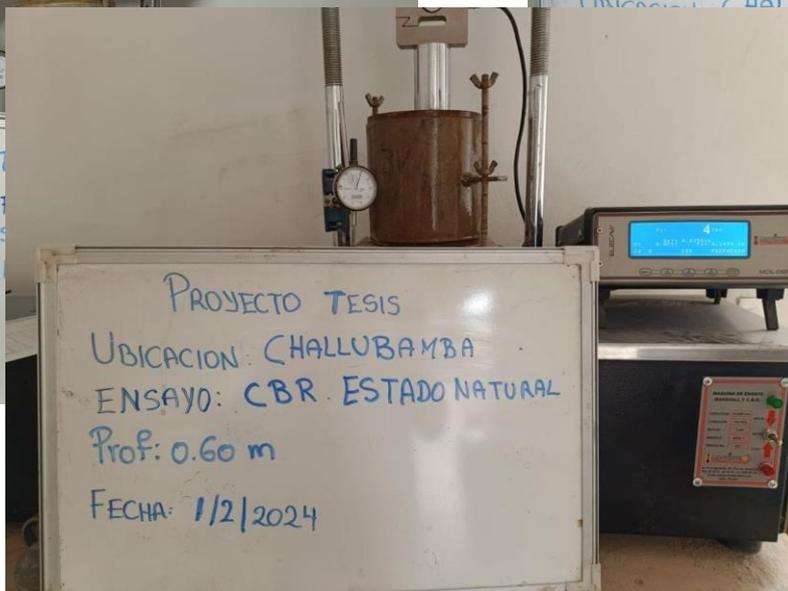
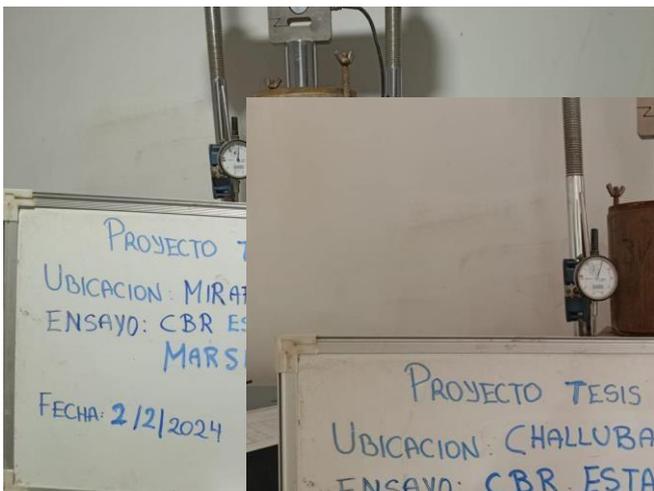
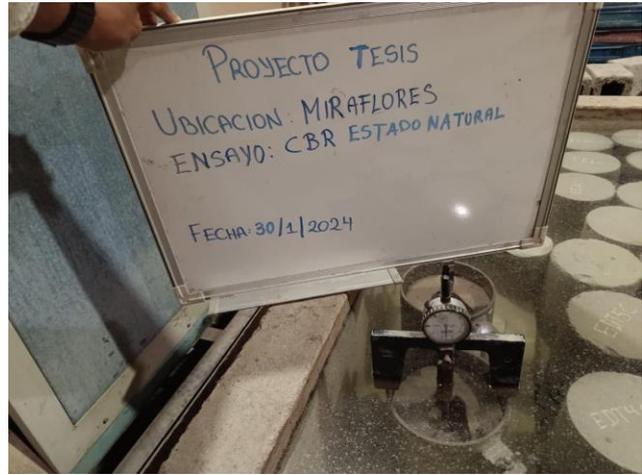
FECHA: 29 de enero de 2024

POZO N°: 1

REALIZADO POR: Ing. Cristina Vintimilla



FORMADO AUTOMATICAMENTE POR:
MARIBEL CRISTINA
VINTIMILLA AVILA



Ensayos de Limites de Atterberg en Suelos Estabilizados

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

MUESTRA DE MIRAFLORES CON ADITIVO DEL 10 % DE CKD

PERFORACIÓN: C-1

PROFUNDIDAD: 0.6m

FECHA: 29/1/2024

HUMEDAD NATURAL						
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
47	----	39,97	34	17,51	15,3	14,43
9	----	40,1	33,83	16,7	14,2	
5	----	39,79	33,81	16,91	14	
LIMITE LIQUIDO						
58	12	22,91	20,57	17,5	30,4	29,12
2	18	23,94	20,87	16,75	29,1	
55	23	23,66	21,24	17,92	29,5	
52	33	24,97	21,91	17,58	28,9	
61	45	24,47	21,73	17,76	29,7	
LIMITE PLASTICO						

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

MUESTRA DE MIRAFLORES CON ADITIVO DEL 12% DE MWP

PERFORACIÓN: C-1

PROFUNDIDAD: 0.6m

FECHA: 29/1/2024

HUMEDAD NATURAL						
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
47	----	39,97	34	17,51	16,3	15,2
9	----	40,1	33,83	16,7	15,7	
5	----	39,79	33,81	16,91	14,9	
LIMITE LIQUIDO						
58	12	22,91	20,57	17,5	30,7	30,36
2	18	23,94	20,87	16,75	32,8	
55	23	23,66	21,24	17,92	30,4	
52	33	24,97	21,91	17,58	32,4	
61	45	24,47	21,73	17,76	30,5	
LIMITE PLASTICO						
49	----	19,1	18,71	17,44	19,4	19,78
6	----	18,46	18,07	16,81	20,6	
13	----	19,03	18,63	17,35	19,6	

Ensayos de Expansividad en Suelos Estabilizados

LABORATORIO DE SUELOS									
ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D 4546)									
PROYECTO:	Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba								
UBICACIÓN:	<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th>Longitud Inicial(cm)</th> <th>Longitud Final(cm)</th> <th>% de Expansion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1,9</td> <td style="text-align: center;">2,516</td> <td style="text-align: center;">32,40</td> </tr> </tbody> </table>			Longitud Inicial(cm)	Longitud Final(cm)	% de Expansion	1,9	2,516	32,40
Longitud Inicial(cm)				Longitud Final(cm)	% de Expansion				
1,9				2,516	32,40				
PERFORACIÓN:									
FECHA:									
Diámetro del molde	$\phi =$	0.10	cm						
Altura del molde	$h =$	2.01	cm						
Área	$A =$	29.80	cm ²						
Volumen	$V =$	59.90	cm ³						
	W molde	$w_m =$	41.50 g						
	W molde + muestra	$W_{m+s} =$	118 g						
	W húmedo muestra	$W_s =$	82 g						
	Densidad húmeda	$\gamma_h =$	1.64 g/cm ³						

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	118	Rec+anillo humedo	120
Rec+Anillo seco	82	Rec+Anillo seco	91
humedad %	13,05	humedad %	19,45

DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,12	6,32
1	10:36	6	0,14	7,37
1	10:39	9	0,18	9,47
1	12:40	70	0,23	12,11
1	15:00	270	0,28	14,74
2	10:40	1458	0,34	17,89
2	12:30	1562	0,38	20,00
2	14:30	1712	0,42	22,11
3	12:30	3004	0,42	22,11
3	15:00	3154	0,62	32,40

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D 4546)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba**UBICACIÓN:** MUESTRA DE
MIRAFLORES CON
ADITIVO DEL 10 %
DE CKD**PERFORACIÓN:** C-1**PROFUNDIDAD:** 0.6m**FECHA:** 1/2/2024**EXPANSION LIBRE**

DATOS DEL MOLDE			CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN		
Diámetro del molde	$\phi =$	6.16 cm	W molde	Wm=	41.56 g
Altura del molde	h =	2.01 cm	W molde + muestra	Wm+s=	118 g
Área	A =	29.80 cm ²	W húmedo muestra	Ws=	84 g
Volumen	V =	59.90 cm ³	Densidad húmeda	Yh=	1.64 g/cm ³

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	118	Rec+anillo humedo	120
Rec+Anillo seco	84	Rec+Anillo seco	96
humedad %	12,74	humedad %	18,44

DIA	HORA	MINUTOS	ΔH	% DE EXPANSION
1	10:30	0	0,12	6,32
1	10:36	6	0,14	7,37
1	10:39	9	0,16	8,42
1	12:40	70	0,16	8,42
1	15:00	270	0,19	10,00
2	10:40	1458	0,19	10,00
2	12:30	1562	0,28	14,74
2	14:30	1712	0,34	17,89
3	12:30	3004	0,35	18,34
3	15:00	3154	0,39	20,30

Longitud Inicial(cm)	Longitud Final(cm)	% de Expansion
1,9	2,286	20,30



LABORATORIO DE SUELOS
MARIBEL CRISTINA
VINTIMILLA AVILA

ING. CRISTINA VINTIMILLA
SENESCYT 1007-05-605320

LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (ASTM D 4546)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

UBICACIÓN:
MUESTRA
MIRAFLORES CON
ADITIVO DE 10%
DE CKD

PERFORACIÓN: C-1 **PROFUNDIDAD:** 0.6m

FECHA: 3/2/2024

PRESIÓN DE EXPANSIÓN

DATOS DEL MOLDE			CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN		
Diámetro del molde	Ø =	6.16 cm	W molde	Wm=	41.56 g
Altura del molde	h =	2.01 cm	W molde + muestra	Wm+s=	110.5 g
Área	A =	29.80 cm ²	W húmedo muestra	Ws=	75.6 g
Volumen	V =	59.90 cm ³	Densidad húmeda	γh=	1.39 g/cm ³

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,56	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	110,5	Rec+anillo humedo	122
Rec+Anillo seco	75,6	Rec+Anillo seco	91
humedad %	13,49	humedad %	18,35

DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	100	100	31,80
1	16:00	120	10	110	34,98
1	17:00	180	10	120	38,16
2	9:00	1140	20	140	44,52
2	13:00	1380	10	150	47,69
2	15:00	1500	-20	130	41,34
2	18:00	1680	-10	120	38,16
3	9:00	2580	0	120	38,16
3	12:00	2760	0	120	38,16

LABORATORIO DE SUELOS
ENSAYO DE PRESIÓN DE HINCHAMIENTO (ASTM D 4546)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

UBICACIÓN:
 MUESTRA
 MIRAFLORES CON
 ADITIVO DE 12%
 DE MWP

PERFORACIÓN: C-1 **PROFUNDIDAD:** 0.6m

FECHA: 3/2/2024

PRESION DE EXPANSION

DATOS DEL MOLDE				CARACTERÍSTICAS DEL ESPÉCIMEN			
Diámetro del molde	φ =	6.16	cm	W molde	Wm=	41.56	g
Altura del molde	h =	2.01	cm	W molde + muestra	Wm+s=	110	g
Área	A =	29.80	cm ²	W húmedo muestra	Ws=	68.4	g
Volumen	V =	59.90	cm ³	Densidad húmeda	Yh=	1.39	g/cm ³

Humedad Inicial		Humedad Final	
Recipiente	41,6	Recipiente	41,56
Rec+anillo humedo	110	Rec+anillo humedo	130,0
Rec+Anillo seco	68,4	Rec+Anillo seco	74,0
humedad %	17,5	humedad %	20,3

DIA	HORA	HORA	CARGA PARCIAL (gr)	CARGA ACUMULADA (gr)	PRESION DE EXPANSION (gr/cm2)
1	14:00	0	0	0	0,0
1	15:00	60	120	120	38,16
1	16:00	120	10	130	41,34
1	17:00	180	10	140	44,52
2	9:00	1140	20	160	50,87
2	13:00	1380	10	170	54,05
2	15:00	1500	-20	150	47,69
2	18:00	1680	-10	140	44,52
3	9:00	2580	0	140	44,52
3	12:00	2760	0	140	44,52



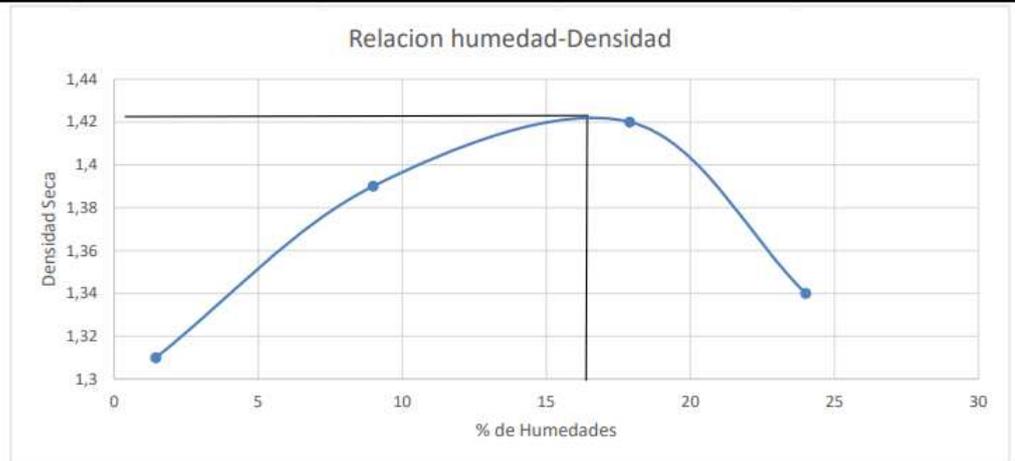
Proctor Modificado y CBR en Suelos Estabilizados

LABORATORIO DE SUELOS			
ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)			
PROYECTO:	Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba		
SECTOR:	Miraflores (10 % CKD)	CLASE DE SUELOS:	Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad
POZO N°:	1	FECHA:	5 febrero de 2024
		REALIZADO POR:	Ing. Cristina Vintimilla
ASSHTO T180-70(modificado)			

MOLDE N1		
PESO	5633	gramos
VOLUMEN	2,105	cm ³
DIAMETRO	15	cm

NUMERO DE CAPAS:5
GOLPES POR CAPA:56
PESO MARTILLO:4,55 kilos
ALTURA CAIDA MARTILLO

DENSIDAD								
PESO SUELO + MOLDE	8643,38		9210,53		9686,93		9605,26	
DENSIDAD HUMEDA	1,43		1,7		1,926		1,887	
DENSIDAD SECA	1,31		1,39		1,42		1,34	
% DE HUMEDAD								
TARRO N°	13	49	8	45	6	11	20	5
PESO HUMEDO +TARRO	41,16	42,18	45,43	44,54	43,23	44,98	41,23	41,75
PESO SECO +TARRO	40,74	41,88	43,1	42,23	39	40,54	36,5	36,85
PESO TARRO	17,35	17,44	16,6	17,52	16,81	16,92	16,77	16,91
% DE HUMEDAD	1,7	1,2	8,7	9,3	19	17,8	23,87	24,37
PROMEDIO % HUMEDAD	1,45		8,99		17,9		24	



MAXIMA DENSIDAD SECA **1,42** g/cm³
% OPTIMO DE HUMEDAD **16,9**

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba
SECTOR: Miraflores(10% CKD) **CLASE DE SUELOS:** Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad
POZO N°: 1 **FECHA:** 5 de febrero 2024
DISTURBADA: No **REALIZADO POR:** Ing. Cristina Vintimilla

DENSIDAD PESO DEL MARTILLO: 4.55 kilos ALTURA DE CAÍDA : 45,72 cm.

Molde No.	1		2		3	
Numero de capas	5		5		5	
# de golpes por capa	56		25		10	
	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO
Peso muestra+molde Gr.	9918	10285	10104	10558	10301	10840
Peso molde Gr.	5876	5876	6232	6232	6711	6711
Peso muestra Gr.	4042	4409	3872	4326	3590	4129
Volumen muestra cm ³ .	2068	2068	2085	2085	2068	2068
Densidad húmeda kg/M ³ .	1,955	2,132	1,857	2,075	1,736	1,997
Densidad seca kg/M ³ .	1,668	1,638	1,581	1,557	1,477	1,455

CONTENIDO DE AGUA ANTES DEL ENSAYO

Tarro No.	61	56	12	19	51	64
Peso húmedo + tarro (gr.)	49,16	51,87	51,03	52,78	49,72	46,85
Peso seco + tarro (gr.)	44,39	47,02	46,01	47,35	44,95	42,39
Peso tarro (gr.)	17,76	17,59	16,86	16,69	17,47	17,32
Contenido de humedad %	17,91	16,48	17,22	17,71	17,36	17,79
Promedio humedad %	17,2		17,47		17,57	

CONTENIDO DE AGUA DESPUES DEL ENSAYO

Tarro No.	13	59	60	54	49	10
Peso húmedo + tarro (gr.)	41,89	41,7	37,68	36,66	42,04	37,87
Peso seco + tarro (gr.)	36,27	36,01	32,64	31,84	35,35	32,11
Peso tarro (gr.)	17,35	17,45	17,24	17,56	17,44	16,63
Contenido de humedad %	29,7	30,66	32,73	33,75	37,35	37,21
Promedio humedad %	28,4		29,8		31,7	
Agua absorbida %		11,7		15,8		19,7

OBSERVACIONES:

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACION SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba

SECTOR: Miraflores(10% CKD)

FECHA:

5 de febrero de 2024

POZO N°: 1

REALIZADO POR:

Ing. Cristina Vintimilla

molde 1			expansión 0,08			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dia	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0			
0,5	25	49	40,6			
1	50	75	87,8			
1,5	75	99	120,8			
2	100	118	140,8	140	1000	14
3	150	144	179,6			
4	200	161	200,8			
5	250	180	230,3			
6	300	196	265,5			
8	400	220	290,7			
10	500	233	329			

molde 2			expansión 0,13			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dia	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0			
0,5	25	30	42,816			
1	50	49	75,9			
1,5	75	70	90,7			
2	100	81	110,8	90	1000	9
3	150	101	145,8			
4	200	115	170			
5	250	132	175,8			
6	300	142	190,8			
8	400	167	202,3			
10	500	185	211,5			

molde 3			expansión 0,15			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	pulg.	dia	lb/pulg2	lb/pulg2	lb/pulg2	
0	0	0	0			
0,5	25	15	22,4			
1	50	22	32,4			
1,5	75	36	47,0			
2	100	47	68,2	70	1000	7
3	150	56	98,9			
4	200	68	120,3			
5	250	78	130,3			
6	300	90	150,6			
8	400	104	156,8			
10	500	115	164,5			



LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba
SECTOR: Miraflores (12% MWP) **CLASE DE SUELOS:** Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad
POZO N°: 1 **FECHA:** 7 febrero de 2024
REALIZADO POR: Ing. Cristina Vintimilla

ASSHTO T180-70(modificado)

MOLDE N1

PESO	5633	gramos
VOLUMEN	2,105	cm3
DIAMETRO	15	cm

NUMERO DE CAPAS:5

GOLPES POR CAPA:56

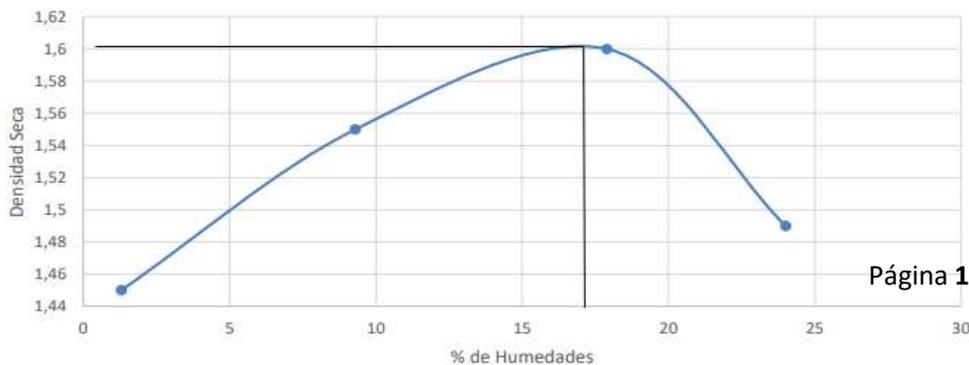
PESO MARTILLO:4,55 kilos

ALTURA CAIDA MARTILLO

DENSIDAD

PESO SUELO + MOLDE	8643,38	9210,53	9686,93	9605,26				
DENSIDAD HUMEDA	1,43	1,7	1,926	1,687				
DENSIDAD SECA	1,46	1,55	1,6	1,49				
% DE HUMEDAD								
TARRO N°	13	49	8	45	6	11	20	5
PESO HUMEDO +TARRO	41,16	42,16	45,43	44,54	43,23	44,98	41,23	41,75
PESO SECO +TARRO	40,74	41,88	43,1	42,23	39	40,54	36,5	36,85
PESO TARRO	17,36	17,44	16,6	17,52	16,81	16,92	16,77	16,91
% DE HUMEDAD	1,5	1,4	8,9	9,5	18,5	17,4	23,46	24,65
PROMEDIO % HUMEDAD	1,3		9,3		17,9		24	

Relacion humedad-Densidad



MAXIMA DENSIDAD SECA **1,6** g/cm3
 % OPTIMO DE HUMEDAD **16,8**

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR. (ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba
SECTOR: Miraflores(12% MWP) **CLASE DE SUELOS:** Arcillas inorgánicas de Alta compresibilidad
POZO N°: 1 **FECHA:** 7 de febrero 2024
DISTURBADA: No **REALIZADO POR:** Ing. Cristina Vintimilla

DENSIDAD PESO DEL MARTILLO: 4.55 kilos ALTURA DE CAÍDA : 45,72 cm.

Molde No.	1		2		3	
Numero de capas	5		5		5	
# de golpes por capa	56		25		10	
	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO	ANTES DEL REMOJO	DESPUÉS DEL REMOJO
Peso muestra+molde Gr.	9918	10285	10104	10558	10301	10840
Peso molde Gr.	5876	5876	6232	6232	6711	6711
Peso muestra Gr.	4042	4409	3872	4326	3590	4129
Volumen muestra cm ³ .	2068	2068	2085	2085	2068	2068
Densidad húmeda kg/M ³ .	1,955	2,132	1,857	2,075	1,736	1,997
Densidad seca kg/M ³ .	1,668	1,638	1,581	1,557	1,477	1,455

CONTENIDO DE AGUA ANTES DEL ENSAYO

Tarro No.	61	56	12	19	51	64
Peso húmedo + tarro (gr.)	49,16	51,87	51,03	52,78	49,72	46,85
Peso seco + tarro (gr.)	44,39	47,02	46,01	47,35	44,95	42,39
Peso tarro (gr.)	17,76	17,59	16,86	16,69	17,47	17,32
Contenido de humedad %	17,91	16,48	17,22	17,71	17,36	17,79
Promedio humedad %	17,2		17,47		17,57	

CONTENIDO DE AGUA DESPUES DEL ENSAYO

Tarro No.	13	59	60	54	49	10
Peso húmedo + tarro (gr.)	41,89	41,7	37,68	36,66	42,04	37,87
Peso seco + tarro (gr.)	36,27	36,01	32,64	31,84	35,35	32,11
Peso tarro (gr.)	17,35	17,45	17,24	17,56	17,44	16,63
Contenido de humedad %	29,7	30,66	32,73	33,75	37,35	37,21
Promedio humedad %	28,6		30,5		29,6	
Agua absorbida %		13,7		19,7		22,8

OBSERVACIONES:

LABORATORIO DE SUELOS

ENSAYO DE RELACIÓN SOPORTE CALIFORNIA CBR(ASTM D1883-73)

PROYECTO: Caracterización de suelos de la zona de Miraflores y Challuabamba
SECTOR: Miraflores(12% MWP)
POZO N°: 1

FECHA: 7 de febrero de 2024
REALIZADO POR: Ing. Cristina Vintimilla

molde 1			expansión 0,08			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	psf.	dal	lb/psf2	lb/psf2	lb/psf2	
0	0	0	0			
0,5	25	49	30,7			
1	50	75	60,8			
1,5	75	99	80,7			
2	100	118	100,7	100	1000	10
3	150	144	120,7			
4	200	161	150,8			
5	250	180	173			
6	300	196	197,9			
8	400	220	213,7			
10	500	233	235			

molde 2			expansión 0,13			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	psf.	dal	lb/psf2	lb/psf2	lb/psf2	
0	0	0	0			
0,5	25	30	10,8			
1	50	49	22,9			
1,5	75	70	34,8			
2	100	81	46,9	50	1000	5
3	150	101	55,9			
4	200	115	65,5			
5	250	132	75,8			
6	300	142	88,6			
8	400	167	104,8			
10	500	185	117,5			

molde 3			expansión 0,15			
TIEMPO	PENETRACION	CARGA	PRESIÓN	PRESIÓN CORRGD.	PRESIÓN ESTÁNDAR	CBR
min.	psf.	dal	lb/psf2	lb/psf2	lb/psf2	
0	0	0	0			
0,5	25	15	4,7			
1	50	22	8,5			
1,5	75	36	10,4			
2	100	47	15,8	30	1000	3
3	150	56	20,7			
4	200	68	30,6			
5	250	78	41,8			
6	300	90	52,7			
8	400	104	61,5			
10	500	115	70,5			



