



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica
Unidad de Posgrado

**El yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la
estabilización de suelos arcillosos expansivos**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Geología con
mención en Geotecnia

AUTOR

Roberto Martin ZAMORA NEVADO

ASESOR

Mg. Enrique GUADALUPE GÓMEZ

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Zamora, R. (2022). *El yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la estabilización de suelos arcillosos expansivos*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

| Datos de autor | |
|----------------------------------|---|
| Nombres y apellidos | Roberto Martín Zamora Nevado |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 16750449 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0001-9741-0708 |
| Datos de asesor | |
| Nombres y apellidos | Enrique Guadalupe Gómez |
| Tipo de documento de identidad | DNI |
| Número de documento de identidad | 09191995 |
| URL de ORCID | https://orcid.org/0000-0001-9583-8807 |
| Datos del jurado | |
| Presidente del jurado | |
| Nombres y apellidos | Carlos del Valle Jurado |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 10266187 |
| Miembro del jurado 1 | |
| Nombres y apellidos | Jorge Eduardo Chira Fernández |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 07342254 |
| Miembro del jurado 2 | |
| Nombres y apellidos | Jaime César Mayorga Rojas |
| Tipo de documento | DNI |
| Número de documento de identidad | 10369482 |
| Datos de investigación | |

| | |
|--|---|
| Línea de investigación | C.0.3.30. Geotecnia aplicada a la Ingeniería Civil |
| Grupo de investigación | No aplica |
| Agencia de financiamiento | Sin financiamiento |
| Ubicación geográfica de la investigación | País: Perú Departamento: Lambayeque Provincia: Chiclayo Distrito: Pimentel Latitud: -6.791212 Longitud: -79.877898 |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | Enero 2019 – julio 2022 |
| URL de disciplinas OCDE | Geotecnia https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.02 Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 |



Acta de Sustentación de Tesis

Sustentación Pública

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los nueve días del mes de noviembre del año 2022, siendo las 12:00 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000648-2022-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 26 de octubre del 2022, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

Título

«El yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la estabilización de suelos arcillosos expansivos»

Que, presenta el Bach. **Roberto Martin Zamora Nevado**, para optar el grado académico de **Magister en Geología** con mención en **Geotecnia**.

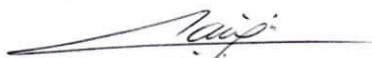
El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° 07016/FIGMMG del 22 de setiembre del 2016, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 04790-R-18 del 08 de agosto del 2018.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente en conformidad al Art. 100 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Muy BUENO (17)

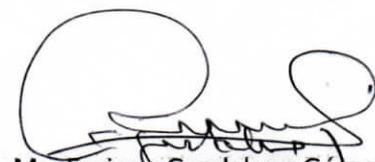
Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el grado académico de **Magister en Geología** con mención en **Geotecnia** al Bach. **Roberto Martin Zamora Nevado**.

Siendo las 13:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


Dr. Carlos del Valle Jurado
Presidente


Dr. Jorge Eduardo Chira Fernández
Secretario


Dr. Jaime Cesar Mayorga Rojas
Miembro


Mg. Enrique Guadalupe Gómez
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

Lima, 28 de Diciembre del 2021

INFORME N° 000045-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA UNIDAD DE POSGRADO

Dr. Rolando Reategui Lozano

OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Tec. Wendy María Sanca Bernabé

DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Grado Académico de Magister en Geología con mención en Geotecnia titulado: **“EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS”**

AUTOR DEL DOCUMENTO:

BACH. ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO

FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

20/12/2021

FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

20/12/2021

SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecorridos
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Nueve por ciento (09 %)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

- | | |
|---------------------------|-----|
| • qdoc.tips | 2% |
| • pt.scribd.com | 1% |
| • myslide.es | 1% |
| • doku.pub | 1% |
| • www.scribd.com | <1% |
| • cybertesis.unmsm.edu.pe | <1% |
| • ri-ng.uaq.mx | <1% |





UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
UNIDAD DE POSGRADO

| | |
|---|-----|
| • documents.mx | <1% |
| • repositorio.continental.edu.pe | <1% |
| • biblioteca.upbbga.edu.co | <1% |
| • Submitted to Universidad Nacional Mayor de San Marcos | <1% |
| • hdl.handle.net | <1% |
| • www.ceniap.gov.ve | <1% |
| • id.scribd.com | <1% |
| • biblioteca.usac.edu.gt | <1% |
| • dspace.ucuenca.edu.ec | <1% |
| • archive.org | <1% |

OBSERVACIONES

Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

- **23/12/2021**

ROLANDO REATEGUI LOZANO
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE POSGRADO

RRL/wsb



DEDICATORIA

A mis padres Roberto y Bertila, por educarme e instruirme en la vida; a mi esposa Yovana por su compañía, atención y apoyo constante; a mi hija Leia por ser mi inspiración y motivación para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Al Mg. Enrique Guadalupe Gómez por su guía y asesoramiento durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Al Instituto Geológico Minero Metalúrgico del Perú (INGEMMET) por su apoyo en la realización de los ensayos de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

A la comunidad campesina “San Pedro de Mórrope” por facilitarme las muestras de yeso para este trabajo de investigación.

Índice General

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Situación Problemática | 1 |
| 1.2. Formulación del Problema | 2 |
| 1.2.1. Problema general | 2 |
| 1.2.2. Problemas específicos | 2 |
| 1.3. Justificación Teórica | 3 |
| 1.4. Justificación Práctica | 3 |
| 1.5. Objetivos..... | 3 |
| 1.5.1. Objetivo general | 3 |
| 1.5.2. Objetivos específicos | 3 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1. Antecedentes de Investigación | 4 |
| 2.2. Bases Teóricas | 9 |
| Yeso | 9 |
| Arcillas..... | 13 |
| 2.2.1. Suelos expansivos | 21 |
| 2.2.4. Resistencia a la compresión simple | 31 |
| 2.2.5. Estabilización o mejoramiento del suelo..... | 33 |
| 2.2.6. Estabilización química de los suelos | 33 |
| 2.2.7. Estabilización mecánica | 36 |
| 2.3. Marco Conceptual o Glosario..... | 40 |
| CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA | 44 |
| 3.1. Hipótesis y Variables | 44 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 3.1.1. | Hipótesis general | 44 |
| 3.1.2. | Hipótesis específicas..... | 44 |
| 3.1.3. | Identificación de variables | 44 |
| 3.2. | Tipo y Diseño de Investigación | 47 |
| 3.2.1. | Ubicación geográfica de las muestras de yeso utilizado..... | 47 |
| 3.2.2. | Ubicación geográfica de las muestras de bentonita utilizada..... | 48 |
| 3.3. | Unidad de Análisis | 48 |
| 3.4. | Población de Estudio | 48 |
| 3.5. | Tamaño de Muestra..... | 49 |
| 3.6. | Selección de Muestra | 49 |
| 3.7. | Técnicas de Recolección de Datos | 49 |
| 3.8. | Análisis e Interpretación de la Información..... | 50 |
| CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | | 51 |
| 4.1. | Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados | 51 |
| 4.1.1. | Geología de los yacimientos de yeso de Mórrope | 51 |
| 4.1.2. | Difractografía de rayos X (DRX) | 55 |
| 4.1.3. | Microscopía electrónica de barrido (MEB)..... | 57 |
| 4.1.4. | Distribución de ensayos y proporcionalidad de mezclas..... | 59 |
| 4.1.5. | Compactación estándar | 59 |
| 4.1.6. | Límites de consistencia | 61 |
| 4.1.7. | Determinación del índice de expansión libre (IEL)..... | 63 |
| 4.1.8. | Ensayo de resistencia a la compresión simple (RCS) | 64 |
| 4.1.9. | Capacidad de intercambio catiónico (CIC) | 66 |
| CONCLUSIONES..... | | 68 |
| RECOMENDACIONES..... | | 69 |

| | |
|--|-----------|
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 70 |
| ANEXOS | 74 |

Lista de Tablas

| | |
|--|-----------|
| Tabla 1 <i>Clasificación de suelos expansivos basados en el límite líquido.....</i> | 25 |
| Tabla 2 <i>Clasificación de suelos expansivos basados en el índice de plasticidad</i> | 26 |
| Tabla 3 <i>Clasificación de suelos expansivos basados en IEL (IS 1498 1970)....</i> | 28 |
| Tabla 4 <i>Escala de calificación de la resistencia a compresión simple de los suelos arcillosos</i> | 32 |
| Tabla 5 <i>Composición mineralógica del yeso calcinado usado</i> | 55 |
| Tabla 6 <i>Composición mineralógica de la bentonita no tratada.....</i> | 56 |
| Tabla 7 <i>Distribución de ensayos y proporcionalidad de mezclas</i> | 59 |
| Tabla 8 <i>Resultados de compactación estándar en bentonita no tratada.....</i> | 60 |
| Tabla 9 <i>Límites de consistencia de la bentonita no tratada</i> | 62 |
| Tabla 10 <i>Influencia del contenido de yeso sobre los límites de consistencia de la bentonita.....</i> | 62 |
| Tabla 11 <i>Influencia del contenido de yeso sobre el porcentaje de expansión de la bentonita</i> | 64 |
| Tabla 12 <i>Influencia del contenido de yeso sobre la RCS de la bentonita.....</i> | 66 |
| Tabla 13 <i>Influencia del contenido de yeso sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la bentonita.....</i> | 67 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Estructura interna del yeso</i> | 10 |
| Figura 2 <i>Mineral de yeso fragmentado previo a su calcinación (Mórrope)</i> | 12 |
| Figura 3 <i>Molino artesanal utilizado en la molienda del yeso (Mórrope)</i> | 12 |
| Figura 4 <i>Estructura de la caolinita</i> | 16 |
| Figura 5 <i>Estructura de la illita</i> | 17 |
| Figura 6 <i>Estructura de la montmorillonita</i> | 18 |
| Figura 7 <i>Yacimiento de bentonita en Cerro Mocho, Ignacio Escudero, Piura</i> ... | 19 |
| Figura 8 <i>Zonas de ocurrencia de bentonita en el Perú</i> | 20 |
| Figura 9 <i>Sistema de enfoque de la radiación X en un difractómetro con geometría Bragg-Brentano</i> | 22 |
| Figura 10 <i>Difractograma de rayos X</i> | 23 |
| Figura 11 <i>Representación esquemática de un microscopio electrónico de barrido</i> | 24 |
| Figura 12 <i>Ensayo diferencial de expansión libre o índice de expansión libre (IEL)</i> | 29 |
| Figura 13 <i>Capacidad de intercambio catiónico (CIC)</i> | 30 |
| Figura 14 <i>Ensayo de resistencia a la compresión simple (RCS)</i> | 31 |
| Figura 15 <i>Estabilización con cal</i> | 34 |
| Figura 16 <i>Estabilización con cemento</i> | 35 |
| Figura 17 <i>Etapas de ejecución del método de vibroflotación</i> | 36 |
| Figura 18 <i>Blasting</i> | 38 |
| Figura 19 <i>Principios de pre-compresión</i> | 39 |
| Figura 20 <i>Drenes de arena</i> | 40 |
| Figura 21 <i>Matriz de operacionalización de variables</i> | 45 |
| Figura 22 <i>Matriz de consistencia</i> | 46 |
| Figura 23 <i>Ubicación geográfica de la zona de extracción del yeso utilizado</i> | 47 |
| Figura 24 <i>Ubicación geográfica de la zona de extracción de la bentonita utilizada</i> | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 Mapa geológico parcial de la zona de Salinas y Mórrope indicando el lugar de extracción de las muestras de yeso utilizadas en la investigación | 52 |
| Figura 26 Mapa geomorfológico parcial de la zona de Salinas y Mórrope indicando el lugar de extracción de las muestras de yeso utilizadas en la presente investigación..... | 53 |
| Figura 27 Yacimiento de yeso en Mórrope (Lambayeque)..... | 54 |
| Figura 28 Observación de capas en un yacimiento de yeso en Mórrope (Lambayeque) | 54 |
| Figura 29 Gráfico DRX correspondiente al yeso calcinado usado..... | 55 |
| Figura 30 Gráfico DRX correspondiente a la bentonita no tratada | 56 |
| Figura 31 Microcristales de montmorillonita con formas laminares y hojosas en la muestra de bentonita no tratada | 57 |
| Figura 32 Agregados microgranulares de halita, de formas cúbicas, englobados por agregados de montmorillonita en la muestra de bentonita no tratada | 58 |
| Figura 33 Microcristales de plagioclasa (andesina) de morfología tabular, recubierto con microescamas de montmorillonita glomerular hojosa en la muestra de bentonita no tratada..... | 58 |
| Figura 34 Curva de compactación estándar de la bentonita no tratada, mostrando su óptimo contenido de humedad y su máximo peso específico seco | 60 |
| Figura 35 Variaciones del límite líquido e índice de plasticidad en las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso..... | 61 |
| Figura 36 Variaciones del índice de expansión libre (IEL) en las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso | 63 |
| Figura 37 Curvas de esfuerzo-deformación obtenidas para muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso | 65 |
| Figura 38 Cambios en la resistencia a la compresión simple de las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso | 65 |
| Figura 39 Variabilidad de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso | 67 |

Lista de Anexos

| | |
|---|-----|
| Anexo 1. Estudio de Difracción de Rayos X (DRX) | 75 |
| Anexo 2. Estudio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) | 82 |
| Anexo 3. Ensayo de Compactación Estándar | 92 |
| Anexo 4. Ensayo Índice de Expansión Libre (IEL) | 94 |
| Anexo 5. Ensayo de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) | 105 |
| Anexo 6. Límites de Consistencia | 112 |
| Anexo 7. Resistencia a la Compresión Simple (RCS) | 117 |
| Anexo 8. Tabla de Mejoras Efectivas | 133 |

RESUMEN

Los suelos arcillosos expansivos representan un peligro significativo para los cimientos de edificios fundados sobre ellos, sobre todo cuando entran en contacto con el agua produciendo un hinchamiento, y en tiempos de sequía su contracción. Esta investigación se centra en la utilidad del yeso de Mórrope como un agregado para estabilizar los suelos arcillosos expansivos. Se añadieron diferentes cantidades de yeso de Mórrope en forma proporcional y porcentual en contenido de bentonita. El diseño de la presente investigación es experimental de subtipo cuasi experimental con grupo de control y es causal. El yacimiento del yeso utilizado se ubica geocronológicamente en la era cenozoica, sistema cuaternario pleistoceno marino, serie reciente, dentro de una zona de llanura o planicie aluvial. La composición mineralógica del yeso calcinado de Mórrope arrojó: anhidrita 56,16%, bassanita 41,03% y yeso 2,81%; y la de bentonita: una composición predominante de 37,78% de montmorillonita con agregados cristalinos laminares desde 2 a 10 μm en promedio. Se consiguieron reducciones importantes con la adición del yeso de Mórrope en la bentonita: límite líquido (-25,56%), índice de plasticidad (-27,37%); índice de expansión libre (IEL) (-75,69%); capacidad de intercambio catiónico (CIC) (-84,46%); y un incremento en la resistencia a la compresión simple de 115,92%. Estas variaciones obtenidas nos indican que el yeso de Mórrope puede usarse como un agregado que estabiliza los suelos arcillosos expansivos.

Palabras clave: suelos arcillosos expansivos, yeso de Mórrope, límite líquido, índice de expansión libre, capacidad de intercambio catiónico, resistencia a la compresión simple.

ABSTRACT

Expansive clayey soils represent a significant danger to the foundations of buildings founded on them, especially when they come into contact with water producing swelling and, in times of drought, shrinkage. This research focuses on the usefulness of Mórrope gypsum as an aggregate for stabilizing expansive clay soils. Different amounts of Mórrope gypsum were added proportionally and percentage-wise in bentonite content. The design of the present investigation is experimental of quasi-experimental subtype with control group and is causal. The gypsum deposit used is located geochronologically in the Cenozoic era, Quaternary Pleistocene Marine system, recent series, within a plain or alluvial plain zone. The mineralogical composition of the calcined gypsum from Mórrope showed: anhydrite 56.16%, bassanite 41.03% and gypsum 2.81%; and that of bentonite: a predominant composition of 37.78% of montmorillonite with lamellar crystalline aggregates from 2 to 10 μm on average. Significant reductions were achieved with the addition of Mórrope gypsum in the bentonite: liquid limit (-25.56%), plasticity index (-27.37%); free expansion index (FXI) (-75.69%); cation exchange capacity (CEC) (-84.46%); and an increase in simple compressive strength of 115.92%. These variations obtained indicate that Mórrope gypsum can be used as an aggregate that stabilizes expansive clay soils.

Key words: expansive clayey soils, Mórrope gypsum, liquid limit, free expansion index, cation exchange capacity, simple compressive strength.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

Muchos edificios y viviendas en el Perú, sobre todo en la zona costera, están contruidos sobre cimientos inadecuados por las condiciones de los suelos existentes en el sitio. Los terrenos aptos para la construcción se vuelven escasos con el crecimiento de nuestras ciudades y a menudo es necesario construir en zonas de suelos marginales que presentan una capacidad de carga insuficiente para soportar el peso sustancial de la estructura. Según (Sridharan & Prakash ,2000) la presencia de suelos expansivos afecta severamente las actividades de construcción en muchas partes del sur-oeste de los Estados Unidos, Sudamérica, Canadá, África, Australia, Europa, India, China y Oriente Medio. Estos suelos se caracterizan por la presencia de una gran proporción de minerales de arcilla altamente activos del grupo de la montmorillonita los cuales son responsables del pronunciado cambio de volumen de los suelos. (Zumrawi et al., 2017) afirman que los suelos expansivos representan un peligro significativo para los cimientos de edificios fundados sobre ellos. Dichos suelos pueden elevar presiones que causan daños considerables sobre todo a las livianas estructuras cargadas. Los ciclos anuales de mojado y secado hacen que el suelo se expanda y luego se contraiga. Encontrar materiales alternativos a los usados tradicionalmente que contribuyan a la solución de esta problemática minimizando o mitigando estos riesgos con eficiencia, alto rendimiento y bajo costo será de vital importancia. Existen estudios y publicaciones que contienen una gran cantidad de técnicas de estabilización utilizando materiales como cemento portland y cal para el tratamiento de los suelos arcillosos expansivos; (Bhattacharja et al., 2003) investigaron sobre los diferentes métodos y efectos del uso de mezclas de cemento portland y cal reportando que eran capaces de estabilizar el suelo y

mejorar sus propiedades; sin embargo, el uso del yeso como agente estabilizador actualmente no está claro.

El interés de la investigación está centrada en el estudio y determinación de las variaciones de los límites de consistencia, índice de expansión libre, resistencia a la compresión simple, e intercambio catiónico en muestras de bentonita no tratadas (sin adiciones de yeso) y tratadas con adiciones de yeso, para identificar su efecto estabilizador; así como la influencia y relación existente entre la geología y mineralogía del yeso con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.

El presente trabajo de investigación se desarrolló fundamentalmente en un laboratorio de mecánica de suelos convencional; así mismo se solicitó apoyo al INGEMMET para realizar los estudios de difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido; las muestras de estudio consistieron en yeso molido de rocas previamente calcinadas, y bentonita molida como suelo arcilloso expansivo.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema general

¿La adición del yeso de Mórrope produce efectos de estabilización en los suelos arcillosos expansivos?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Las características geológicas del yeso de Mórrope influyen en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos?
2. ¿La composición mineralógica del yeso de Mórrope se relaciona con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos?

3. ¿En qué cantidad el yeso de Mórrope influye en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos?

1.3. Justificación Teórica

La presente investigación se justifica porque se obtienen resultados de las distintas propiedades físicas del yeso y la bentonita.

1.4. Justificación Práctica

Este trabajo de investigación pretende complementar los conocimientos teóricos ya existentes sobre el control de la expansividad de los suelos arcillosos, poniéndolo a disposición de ingenieros y empresas interesadas en los procesos de alteración in situ de las propiedades ingenieriles del suelo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar los efectos que produce el yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Determinar las características geológicas del yeso de Mórrope que influyen en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.
2. Determinar la relación de la composición mineralógica del yeso de Mórrope con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.

3. Determinar en qué cantidad el yeso de Mórrope influye en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Investigación

2.1.1. Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como sub-rasante mejorada y/o sub-base de pavimentos

(Pérez, 2012) establece que algunos suelos arcillosos no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de pavimentación, por su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza. Como solución a este problema plantea alternativas de estabilización para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados. Diseña un programa experimental que considera primero hacer ensayos a la muestra en estado natural (arcilla al 100% denominada sub rasante) y luego con la adición de la ceniza volante proveniente de la central termoeléctrica de Ilo. Considera también adicionar cemento al suelo natural además de la ceniza volante a fin de obtener mejores resultados. Concluye que: las cenizas volantes funcionan como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, requiriendo ser adicionado en porcentajes excesivos, al menos en el caso de una arcilla expansiva, en promedio mayor a 20%.

2.1.2. Suelos expansivos en Talara

(Castro, 1992) explica evaluar el porcentaje de expansión libre con carga y expansión controlada de las arcillas expansivas que predominan en la zona. De igual manera, determinar sus características, propiedades físicas y químicas y el potencial de hinchamiento de las arcillas los cuales se han

evaluado mediante los análisis y ensayos realizados en muestras disturbadas e inalteradas extraídas de calicatas y taludes que se presentan en las formaciones de arcillas lutáceas como suelos residuales. Dentro de sus conclusiones recoge que variaciones tanto de temperatura, humedad, tensión capilar, presión efectiva, proporción de partículas menores de 2 micras y de cuán activa sea la especie mineralógica presente en la arcilla, influirán en el incremento de las variaciones volumétricas. A su vez este hinchamiento producirá cambios en la resistencia, compresibilidad y permeabilidad.

2.1.3. Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la determinación de la resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos estabilizados con cal y cemento

(Velarde, 2015) menciona que la creciente importancia medioambiental por minimizar la creación de nuevos vertederos es una meta aún no lograda por la comunidad de expertos geotécnicos. Agrega también que un volumen importante de materiales clasificados como tolerables, marginales e inadecuados podría ser reutilizado con un procedimiento adecuado de estabilización, con su beneficio económico y medioambiental asociado. Resalta que este problema se ha venido mitigando con la utilización de diversos métodos que principalmente se orientan hacia su estabilización, bien sea física o electroquímica, entre los cuales se destacan la cal, cemento, que han sido estudio de investigaciones aisladas, pero no se encontraron investigaciones que evalúan simultáneamente estas dos alternativas de estabilización. Concluye que en la estabilización de suelos y taludes se recomienda no excederse del 8% de cal en el suelo ya que aumenta la resistencia, pero también la plasticidad.

2.1.4. Evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas

(Tauta et al., 2006) afirman en su investigación, que los efectos de las arcillas expansivas han sido un problema que cada año se ve reflejado en cuantiosas pérdidas de dinero. Establecen también que la utilización de la bentonita como arcilla de análisis, limita la investigación a condiciones de expansión elevadas, que permiten mediante un trabajo en el laboratorio con ensayos de caracterización física y mecánica determinar cuál aditivo y dosificación se comporta mejor en el ambiente más crítico, para lo cual se utilizan diferentes concentraciones para cada aditivo. A través de ensayos físicos y mecánicos de las mezclas concluyen que la cal en un porcentaje del 10% es el aditivo que reduce en mayor proporción las propiedades expansivas de la bentonita, desde las concentraciones más bajas. A diferencia de las cenizas volantes que requieren ser adicionadas en porcentajes excesivos y del aceite sulfonado sobre el cual no se encontró una metodología adecuada de laboratorio que permita conocer sus propiedades como estabilizador.

2.1.5. Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos

(Valle, 2010) indica que los sistemas de localización de sulfatos solubles en el suelo han mejorado sustancialmente, sin embargo, los técnicos no han podido comprobar métodos de estabilización del suelo que aseguren la estabilidad del terreno y, eliminación o reducción a niveles tolerables sus patologías por altos contenidos de sulfatos solubles incluido el yeso; aquí se analiza cuatro métodos experimentales desarrollados por los investigadores de la universidad de Arlington, Texas, estabilización con cenizas volantes bajas en calcio, clase F; estabilización con cemento

sulfato resistente, tipo V; estabilización con escorias granuladas de alto horno; estabilización con cal mezclada con fibras fibriladas de polipropileno. Sus conclusiones establecen que todos los métodos analizados de estabilización disminuyen el índice de plasticidad, hinchamiento libre vertical y retracción lineal, adicionalmente todos incrementan la resistencia del suelo.

2.1.6. Estabilización de arcillas expansivas con geomateriales de la región

(Ordoñez, 2019) resalta que los daños estructurales causados por las arcillas expansivas a las obras de ingeniería, cimentaciones o pavimentos, causan pérdidas económicas sustanciales y un inadecuado servicio de las construcciones. Por lo cual este problema ha sido y es motivo de investigación experimental enfocada a la caracterización y mitigación de riesgos geotécnicos. La investigación experimental las centró en realizar sondeos tipo pozo a cielo abierto (PCA), sondeos profundos tipo mixtos (SPM) combinado con la prueba de penetración estándar (SPT); recuperándose muestras alteradas y realizando ensayos para determinar las propiedades índices mecánicas. Concluye que, en los sitios de estudio, el potencial de expansión de los estratos de arcilla es de medio, alto a muy alto. Ubicando zonas activas de 3 a 5 y hasta 7 m de profundidad, en época de estiaje y lluvias. Recomendando emplear las mezclas de arcilla con los geomateriales: caliche, granzón y arenas, para mitigar los riesgos geotécnicos y garantizar la estabilidad de las construcciones, pavimentos y edificaciones.

2.1.7. Estabilización de subrasante de vías en suelos expansivos con cloruro de sodio-Avenida Jacinto Ibarra, distrito de Chilca-Huancayo 2020

(Quispe, 2020) prioriza como objetivo de su investigación determinar la influencia del cloruro de sodio en la estabilización de la subrasante de suelo expansivo. Su metodología consistió en obtener muestras de suelo

arcilloso expansivo, para posteriormente pasarlas a analizar en laboratorio con las investigaciones pertinentes como son: contenido de humedad, ensayo de granulometría, límites líquidos y plásticos y con estos ensayos poder catalogar el suelo en un sistema conveniente. Concluye que al incrementar el cloruro de sodio en proporciones de 4%, 8% y 12% mejora las propiedades mecánicas, aumentando la resistencia, incrementando el valor del California Bearing Ratio hasta un 12.5% en asimilación al espécimen estándar.

2.1.8. Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca

(Bravo & Daza, 2019) afirman que existen diferentes tipos de suelos con características que generan complicaciones a las estructuras asentadas sobre los mismos, un claro ejemplo son los suelos expansivos. En su investigación se analizaron tres tipos de suelos expansivos de la ciudad de Cuenca, seleccionando al de propiedades más desfavorables, para aplicarle posteriormente diferentes tratamientos para controlar su potencial expansivo, usando aditivos como: cal, cemento, ceniza volante, humo de sílice y yeso. Resaltando en una de sus conclusiones que los estabilizantes con mayor contenido de calcio en su composición, son más beneficiosos al momento de estabilizar un suelo expansivo, ya que el intercambio catiónico se realiza con mayor facilidad, lo que genera una reducción en el potencial expansivo y contribuye a la estabilización del suelo. Así mismo es una de sus recomendaciones realizar un estudio comparativo más profundo entre los diferentes ensayos usados para determinar el carácter expansivo de un suelo; pudiéndose conseguir una caracterización óptima al utilizar ensayos más sencillos y menos costosos, siempre y cuando sea posible caracterizar de manera correcta el potencial expansivo del material.

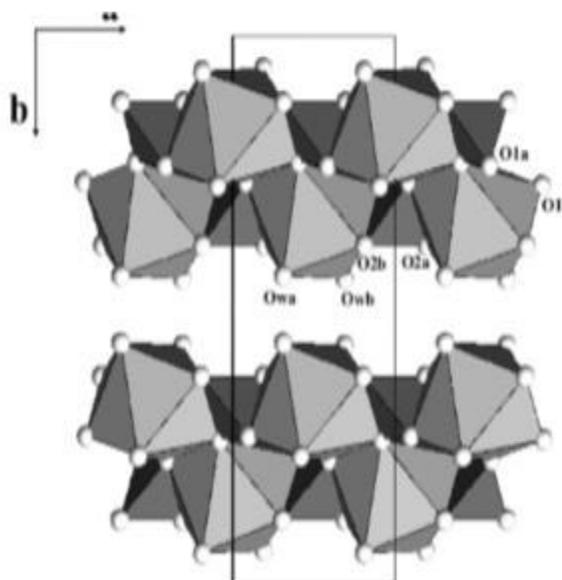
2.2. Bases Teóricas

Yeso

Mineral bihidratado de sulfato de calcio ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Estable en la superficie terrestre. El yeso cuando es calentado pierde una parte de su agua de cristalización que eventualmente puede recuperar. Esta propiedad es ampliamente aprovechada. El yeso calcinado industrialmente se empapa con el agua y se le da la forma deseada que mantiene después de hidratarse y endurecerse. La mayor parte de yeso se utiliza en forma calcinada empleándolo principalmente en la construcción y de manera mucho más restringida para modelos y moldes incluyendo los metalúrgicos y medicinales. El yeso crudo se emplea como estabilizador de suelos alcalinos y salinos en la agricultura. Su principal uso industrial es de “retardador” en la industria de cemento portland. Se le utiliza también para elaborar aislantes térmicos y acústicos. El yeso se emplea también como relleno en la industria del papel, siendo en este caso, muy importante la blancura. El alabastro y piedra de Huamanga son yeso puro y cristalizado (Dunin, 1996).

Cristalografía del yeso

La cristalografía del yeso se presenta en el sistema Monoclínico; $2/m$. Los cristales son de hábito simple; tabular sobre $\{010\}$; forma rómbica con aristas biseladas por $\{120\}$ y $\{111\}$, (ver Figura 1).

Figura 1*Estructura interna del yeso**Nota.* De Nazzareni et al., 2010

Existen formas que se presentan en la naturaleza raramente, con maclas, sobre $\{100\}$, en configuración de cola de golondrina. $C2/c$; $a=6.28$, $b=15.15$, $c=5.67\text{\AA}$, $\beta=114^\circ 12'$; $Z=4$. $d's$: 7.56 (10), 4.27 (5); 3.06 (6), 2.87 (2), 2.68 (3) (Klein & Hurlbut, 2001).

Propiedades físicas del yeso

El yeso presenta exfoliación perfecta $\{010\}$ dando hojas delgadas; con superficie concoidea $\{100\}$ y con fractura fibrosa $\{011\}$. H2. G 2,32; por lo general exhibe un brillo vítreo, sedoso o perlado, de naturaleza incolora, blanquecina o grisácea; presentando tonos diversos de amarillo a rojo castaño ocasionados por la presencia de impurezas; el espato satinado es un yeso fibroso de brillo sedoso que se presenta en la naturaleza con características transparentes o translúcidas; el alabastro es un yeso de

grano fino; la selenita es otra de las variedades de yeso cuyas hojas se caracterizan por ser de naturaleza transparente e incolora; el yeso presenta las siguientes características ópticas: (+); $\alpha = 1,520$, $\beta = 1,523$, $\gamma = 1,530$; $2V = 58^\circ$; $Y = b$, $X \wedge c = -37^\circ$; $r > v$ (Klein & Hurlbut, 2001).

Composición y estructura del yeso

El yeso en composición porcentual presenta: H₂O 20,9%, CaO 32,6% y SO₃ 46,5%. Como resultado de la deshidratación del yeso el CaSO₄.2H₂O se forma en diferentes fases: α CaSO₄ producto de la pérdida total del agua, o en fase de tipo metaestable, CaSO₄. ½ H₂O. En la deshidratación las iniciales 1½ moléculas de H₂O del yeso se consumen de forma continua a temperaturas desde 0° hasta 65°C, pudiendo presentarse en el yeso ligeros cambios estructurales; alrededor de los 70°C la ½ molécula restante de H₂O de CaSO₄. ½ H₂O es retenida aun fuertemente, es entre los 95°C cuando se produce su pérdida, transformándose el yeso en anhidrita polimorfa (Klein & Hurlbut, 2001).

Diagnóstico

El yeso se presenta en la naturaleza caracterizado por una consistencia blanda y tres distintas exfoliaciones (Klein & Hurlbut, 2001).

Producción y empleo del yeso

La producción de escayola es uno de los empleos principales del yeso; para su elaboración es calcinado y posteriormente molido, eliminándose en el proceso el agua hasta un 75%, obteniéndose CaSO₄. ½H₂O (ver Figuras 2 y 3).

Figura 2

*Mineral de yeso fragmentado previo a su calcinación
(Mórrope)*

**Figura 3**

*Molino artesanal utilizado en la molienda del yeso
(Mórrope)*



La escayola al entrar en contacto con agua la absorbe por lo tanto cristaliza, endurece o fragua; dentro de las utilidades del yeso se consideran: como uso de material de construcción, revestimiento de molduras, paredes, vaciados, decoración de interiores, como fertilizante mezclado con arcilla, es empleado sin calcinar como retardante en el cemento de tipo portland; el alabastro y el espató satinado tallados y pulidos tienen una utilidad ornamental (Klein & Hurlbut, 2001).

Arcillas

Se puede decir que las arcillas son sedimentos que contienen cristales bien finos ($<2\mu\text{m}$), compuestos por filosilicatos producto de la hidratación de aluminio, pudiendo presentar impurezas como las de limonita o cuarzo; poseen características plásticas cuando entran en contacto con el agua y cuando se secan retienen su forma; su clasificación está en función de los minerales que predominan en su composición dividiéndose en: illitas, caolinitas y montmorillonitas (esmeclitas). Algunas son de interés industrial como las bentonitas que tienen en su composición principal esmeclitas, y el caolín que tiene a la caolinita como su componente principal; el resto de arcillas son las que tienen en su composición illitas y otros minerales arcillosos; todas estas variedades existen en el Perú (Dunin, 1996).

Génesis de las arcillas

Las arcillas se forman por intemperismo o alteración hidrotermal de los silicatos o vidrios enriquecidos de aluminio, las cuales después de ser alteradas se pueden quedar en el mismo sitio en que se formaron o transportadas a otro lugar por agentes como el agua; recibiendo las primeras la denominación de arcillas residuales, presentándose en capas irregulares suprayacentes de rocas alteradas y que en procesos

avanzados adquieren las texturas de rocas en descomposición, como los piroclásticos; mientras que las segundas, las transportadas, se presentan formando estratos tabulares o en algunos casos lentes; el proceso de transporte ayuda a remover las impurezas de las arcillas siempre y cuando no sea turbulento y se depositen en aguas tranquilas; la génesis de las arcillas determina su pureza y mineralogía (Dunin, 1996).

Forma de las arcillas

Los primeros estudiosos de las arcillas visualizaron las partículas individuales como más o menos esféricas y amorfas o no cristalinas internamente. Sin embargo, ahora está definitivamente establecido que las partículas están laminadas, que están formadas por capas de placas o escamas y que son cristalinas, con una disposición interna ordenada. Sus tamaños y formas individuales dependen de sus organizaciones mineralógicas y de las condiciones en las que se han desarrollado. Algunas de estas partículas son parecidas a la mica y definitivamente hexagonales; otras tienen forma irregular de placas o escamas; algunas parecen tener forma de listón o incluso barras; y otras son esferoidales. Los bordes de ciertas partículas parecen tener un corte limpio, mientras que la apariencia de otras es indistintamente deshilachada o esponjosa. En todos los casos, la extensión horizontal de las partículas individuales excede en gran medida sus dimensiones verticales (Brady, 1984).

Área superficial (Superficie específica)

Todas las partículas de arcilla, simplemente por su pequeño tamaño, exponen una gran cantidad de superficie externa. La superficie externa de 1g de arcilla es al menos 1000 veces mayor que la de 1 g de arena gruesa. En algunas arcillas también hay superficies internas extensas. Esta interfaz interna se produce entre las unidades cristalinas en forma de placa que componen cada partícula, y que comúnmente exceden en gran

medida el área de la superficie externa. El área superficial de las arcillas con capas de silicatos variará de 10 m²/g para las arcillas con solo superficies externas a más de 800 m²/g para aquellas con superficies internas extensas (Brady, 1984).

La doble capa iónica

Las diminutas partículas de arcilla, denominadas micelas (microcélulas), normalmente tienen cargas negativas. En consecuencia, cientos de miles de iones o cationes cargados positivamente son atraídos a cada cristal (ejm. H⁺, Al³⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺), lo que da lugar a lo que se conoce como doble capa iónica. La partícula constituye la capa iónica interna, que es esencialmente un anión enorme, cuyas superficies tanto externa e interna tienen una carga muy negativa. La capa iónica externa está formada por un enjambre de cationes relativamente sueltos que son atraídos por las superficies cargadas negativamente. Por lo tanto, una partícula de arcilla está acompañada de una enorme cantidad de cationes que se adsorben o se mantienen en las superficies de las partículas. Asociado con la capa de cationes que se acumula en las superficies adsorptivas de las partículas de arcilla hay una gran cantidad de moléculas de agua. Algunas de estas moléculas de agua son transportadas por los cationes absorbidos, ya que la mayoría de ellas están definitivamente hidratadas. Además, algunos silicatos de arcilla contienen numerosas moléculas de agua, así como cationes empaquetados entre las placas (área interna de la superficie) que forman la micela de arcilla. Se hace referencia a estos diversos tipos de agua cuando se está considerando la hidratación de las arcillas (Brady, 1984).

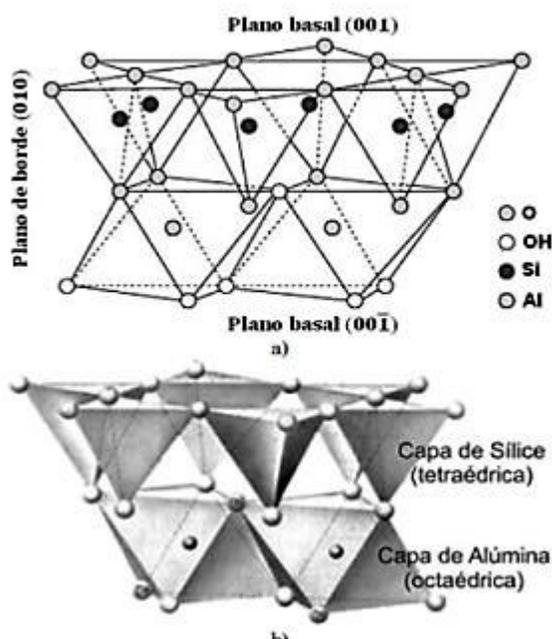
Minerales arcillosos

Caolinita

Consiste en capas repetidas de láminas de sílice-gibbsita elementales. Cada capa es de aproximadamente 7,2 Å de espesor (ver Figura 4).

Figura 4

Estructura de la caolinita



Nota. De Bruckard & Holmes, 2009

Las capas se unen con enlaces del hidrógeno, sus plaquetas tienen dimensiones laterales de 1 000 a 20 000 Å y espesores de 100 a 1 000 Å; las superficies de sus partículas tienen un área aproximada por unidad de masa de 15 m²/g; a la relación del área superficial por unidad de masa se le conoce como superficie específica (Braja, 2015).

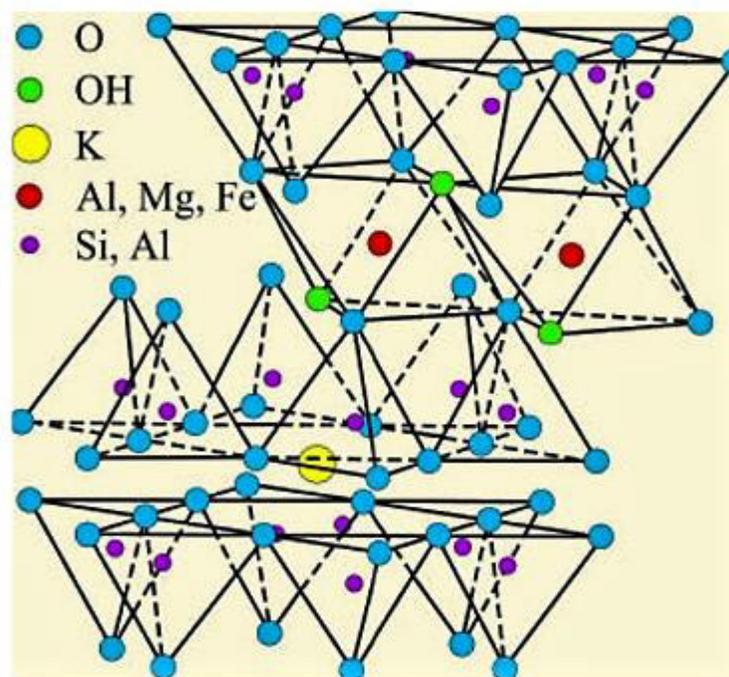
Illita

Compuesta por una lámina de gibbsita adherida a dos láminas síliceas en la parte superior como en la inferior; también es conocida como arcilla micácea, sus capas están unidas por iones de potasio, la negatividad

de su carga que equilibra los iones de potasio deriva del reemplazo de aluminio por silicio en sus láminas de configuración tetraédrica (ver Figura 5).

Figura 5

Estructura de la illita

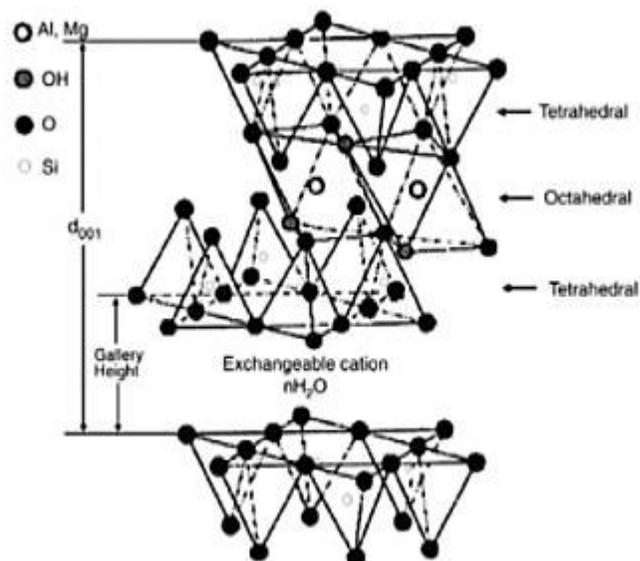


Nota. De Hiteshkumar, 2003

El reemplazo de un elemento por otro sin que se produzcan cambios en la forma de sus cristales se denomina sustitución isomórfica, las dimensiones de las partículas de illita oscilan entre los 1000 y 5000 Å, y espesores que están entre los 50 y 500 Å, adicionalmente poseen una superficie específica aproximada en sus partículas de 80 m²/g (Braja, 2015).

Montmorillonita

Su estructura es similar a la illita, una lámina de gibsita entre dos láminas síliceas, existiendo una sustitución isomórfica de hierro y magnesio para el aluminio en sus láminas de configuración octaédrica (ver Figura 6).

Figura 6*Estructura de la montmorillonita**Nota. De Ashoori et al., 2016*

No hay presencia de iones potasio como en la illita, y el agua es atraída en gran cantidad para rellenar los espacios entre capas, las dimensiones de sus partículas oscilan entre los 1 000 a 5 000 Å con espesores que varían entre los 10 y 50 Å, adicionalmente tienen una superficie específica aproximada de 800 m²/g (Braja, 2015).

Bentonita

Es una arcilla formada por filosilicatos de montmorillonitas (esmeclitas) principalmente, captan iones en su red cristalina de otros metales, entre ellos el sodio, aluminio, magnesio, calcio y en menor proporción hierro; estas se originan de las alteraciones volcánicas y se dividen en magnesianas, sódicas y cálcicas; las sódicas se caracterizan por absorber gran cantidad de agua por lo que se hinchan más que las cálcicas, su calidad depende de su capacidad de hidratación y captación de los iones metálicos, esta capacidad es conferida por la montmorillonita, las mejores

bentonitas utilizadas comercialmente poseen entre 80 y 90% de este mineral; para que esta capacidad sea efectiva, la bentonita debe presentar una granulometría muy fina, a estas bentonitas se les conoce como atapulgitas (Dunin, 1996).

Distribución, geología y calidad de bentonitas en el Perú

En el Perú los depósitos están ubicados en las franjas costera e interandina, formándose por desvitrificaciones de tobas originadas por el volcanismo del cenozoico (ver Figura 7).

Figura 7

Yacimiento de bentonita en Cerro Mocho, Ignacio Escudero, Piura

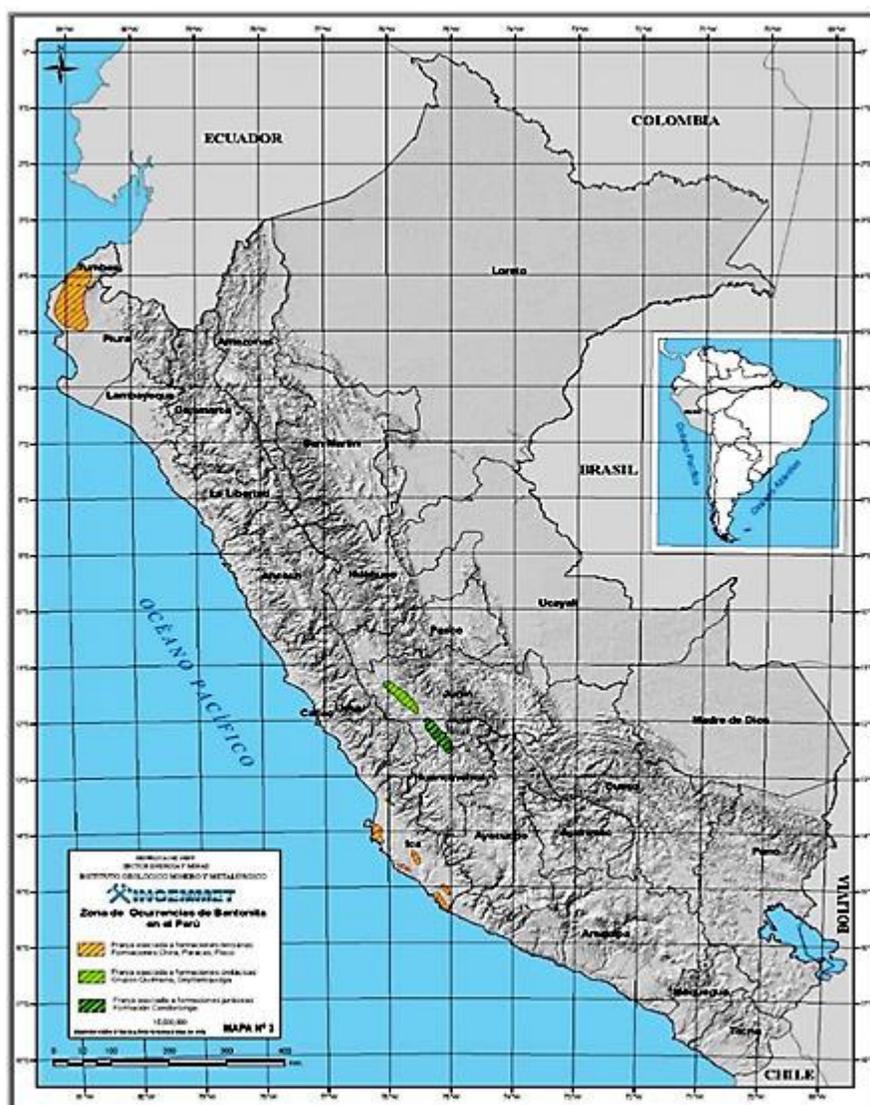


En la costa y en la sierra los orígenes de la bentonita son distintos al parecer; en la costa se originaron desvitrificaciones en escenarios marinos o continentales desérticos; la bentonita de Piura y Tumbes se caracteriza por una composición de montmorillonita (entre 45 - 75%), cristobalita (entre 10 - 30%) y cantidades inferiores de otros minerales; la composición química promedio para estas bentonitas es de 0,2-1,1% CaO, 1,5-2,4%

MgO, 1,9-3,7% Na₂O, 2,5-3,9% Fe₂O₃, 12-15% Al₂O₃ y 60-67% SiO₂; existen en el departamento de Ica bentonitas cuya composición porcentual es más rica en calcio, pero más pobres ligeramente en sílice (55 - 57%) y en sodio (ver Figura 8), (Dunin, 1996).

Figura 8

Zonas de ocurrencia de bentonita en el Perú



Nota. De INGEMMET, 2009

2.2.1. Suelos expansivos

Cualquier suelo cuyos cambios de volumen sean sensibles a la humedad normalmente se considera un suelo expansivo. Los suelos expansivos se consideran suelos problemáticos ya que afectan la estabilidad de las estructuras fundadas en ellos. Por lo tanto, se vuelve muy esencial para un ingeniero geotécnico en ejercicio identificar y caracterizar adecuadamente dichos suelos. Esto, a su vez, ayudará en la gestión de recursos materiales, de tiempo, financieros y humanos, que son los componentes esenciales de cualquier gestión de proyecto. Los suelos expansivos se caracterizan por la presencia de minerales arcillosos en expansión pertenecientes al grupo de las esmectitas, siendo la montmorillonita un miembro importante de ese grupo. Estos minerales arcillosos se caracterizan por: Fuerzas de Van der Waals muy débiles entre las celdas unitarias adyacentes del mineral; sustitución isomorfa apreciable durante la formación del mineral arcilloso, lo que conduce a cargas superficiales negativas muy elevadas; capacidad de intercambio catiónico muy elevado y gran superficie específica, (Asuri & Keshavamurthy, 2016).

2.2.2. Caracterización de los suelos expansivos

Varios criterios se han adoptado para reconocer la presencia de minerales arcillosos en un suelo natural expansivo, estos pueden clasificarse ampliamente en dos categorías, métodos de identificación mineralógica y métodos inferenciales. Las técnicas que pertenecen a la categoría de métodos de identificación mineralógica son: Análisis de difracción de rayos X, análisis térmico diferencial, adsorción de tinte, análisis químico y microscopía de barrido electrónico. Las técnicas que pertenecen a la categoría de métodos de ensayo inferencial intentan vincular algunas de las propiedades índices de los suelos de grano fino con la composición mineralógica de la arcilla del suelo y, por lo tanto, estimar su potencial de

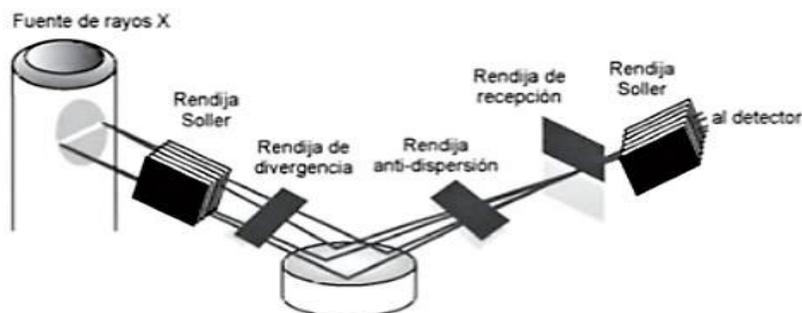
hinchamiento. Pueden clasificarse como métodos directos e indirectos (Asuri & Keshavamurthy, 2016).

Difracción de rayos X

Los rayos X son un tipo de radiación electromagnética invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de impresionar películas fotográficas. La longitud de onda está entre 10^{-8} a 10^{-12} m, correspondiendo a frecuencias entre los 10^{16} a 10^{20} Hz; su radiación se caracteriza por ser altamente energética y penetrante, los rayos X no son desviados por la acción de los campos magnéticos o eléctricos y su propagación es siempre rectilínea; interactúan con la materia evidenciando fenómenos como la dispersión, cuando la dispersión de los rayos X es originada por átomos que se encuentran en posiciones ordenadas se denomina a este fenómeno difracción; un equipo básico de difracción de rayos X, (ver Figura 9), incluye la fuente que es el emisor de radiación X, el enfoque, colimador, selector, filtro, etc. que adecúan la radiación con la finalidad de interpretar las señales obtenidas de una muestra, adicionalmente se incluye un portamuestras y finalmente un detector que recibe la información de la difracción; toda sustancia presenta un patrón de difracción único, que se

Figura 9

Sistema de enfoque de la radiación X en un difractómetro con geometría Bragg-Brentano

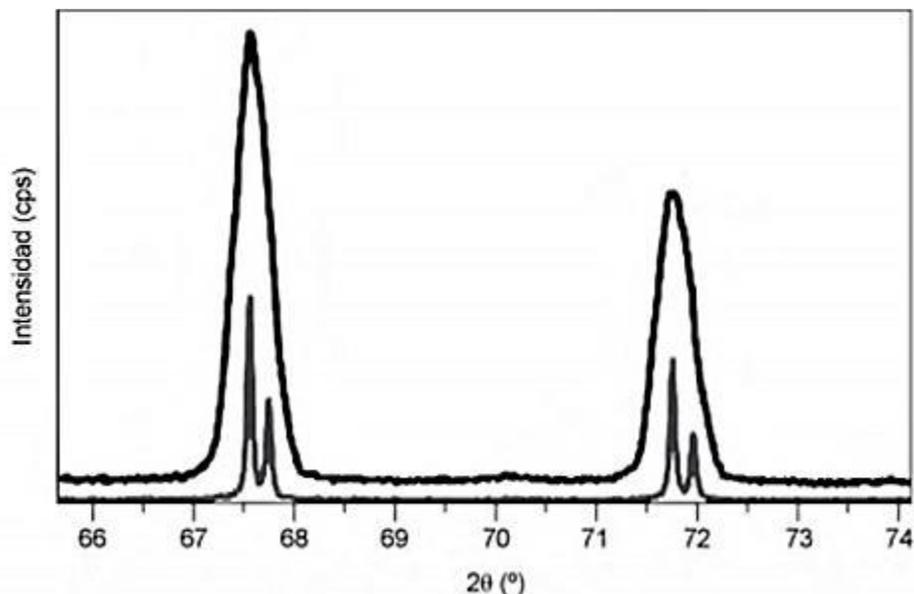


Nota. De Faraldos & Goberna, 2011

caracteriza y distingue de las demás (ver Figura 10); esto permite que compuestos presentes o aislados sean identificados en determinada mezcla, diferenciándose inclusive en una misma sustancia formas en estado alotrópico (Faraldos & Goberna, 2011).

Figura 10

Difractograma de rayos X



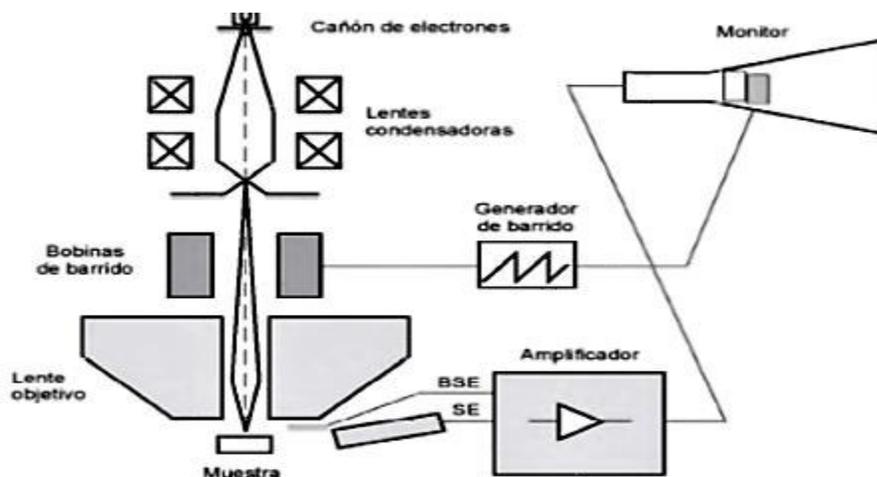
Nota. De Faraldos & Goberna, 2011

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La formación de imágenes en microscopía electrónica de barrido se basa en el fenómeno óptico de la reflexión, donde el objeto recibe una iluminación frontal, entonces se produce el reflejo de los haces que son los que transmiten la información; los microscopios electrónicos de barrido utilizan lentes y objetivos por donde atraviesa el haz, realizando el barrido en la muestra por acción de bobinas y contando la cantidad de electrones emitidos por los puntos de la superficie a través de detectores (ver Figura 11).

Figura 11

Representación esquemática de un microscopio electrónico de barrido



Nota. De Faraldos & Goberna, 2011

Las lentes utilizadas se usan para la ampliación y el enfoque del haz que incide sobre la muestra y su superficie, lo que le confiere a este método ventajas en cuanto a la profundidad del campo de la imagen y ampliación del rango (Faraldos & Goberna, 2011).

Límite líquido

El límite líquido es el contenido de humedad en el cual un suelo en estado plástico comienza a fluir bajo la acción de una fuerza aplicada; según Gavande (1973), el límite superior de plasticidad (esto es, el límite líquido) se refiere al agua en cantidad existente en un suelo al momento que este se comporta como fluido dejando de ser sólido; según Malagón (1976), a medida que la humedad en el suelo se incrementa, desciende la tensión superficial por unidad de área; esta descompensación originada por la incapacidad de incrementar el área de contacto entre partículas ocasiona en el suelo un descenso de su consistencia; al saturarse el suelo, la

tensión superficial deja de existir y el suelo fluye, estas relaciones sólo se dan en suelos que tienen contenido de arcilla suficiente (ver Tabla 1) para hacer que la atracción molecular sea efectiva, ya que la atracción molecular del limo y la arena es insignificante (Guerra, 2018).

Tabla 1

Clasificación de suelos expansivos basados en el límite líquido

| Potencial de hinchamiento | Límite líquido (%) | | |
|---------------------------|--------------------|---------------------|-----------------|
| | Chen 1965 | Snethan et al. 1977 | IS: 1498 - 1970 |
| Bajo | Menor que 30 | Menor que 50 | 20 a 35 |
| Medio-marginal | 30 a 40 | 50 a 60 | 35 a 50 |
| Alto | 40 a 60 | Mayor que 60 | 50 a 70 |
| Muy alto | Mayor que 60 | - | 70 a 90 |

Nota. Adaptado de Asuri & Keshavamurthy, 2016

Límite plástico

El límite plástico es el contenido de humedad en el cual un suelo en estado plástico deja de ser moldeable y comienza a agrietarse, sin perder sus propiedades plásticas, bajo la acción de una fuerza aplicada; la capacidad adquirida por el suelo a ser moldeado hace que mantenga su forma incluso después (de) que la presión de deformabilidad haya desaparecido; según Pla (1976), al tránsito entre la consistencia plástica y la pulverizable

(semisólida) se le denomina límite plástico, y es en el contenido mínimo de humedad, en el cual el suelo puede manejarse sin deteriorar sus propiedades físicas. También, se define (Malagón) como el momento cuando el contenido de humedad en el suelo permite que éste se deje amasar en cilindros de 3 a 4 mm de diámetro y de 5 a 6 cm de longitud, sin desmenuzarse (Guerra, 2018).

Índice de plasticidad

El índice de plasticidad es el porcentaje de agua gravimétrico en el suelo entre el límite superior e inferior de plasticidad (Montenegro y Malagón). Esto es, que indica la magnitud del intervalo de humedades en el cual el suelo posee consistencia plástica, (ver Tabla 2).

Tabla 2

Clasificación de suelos expansivos basados en el índice de plasticidad

| Potencial de hinchamiento | Índice de Plasticidad % | | |
|---------------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| | Holtz & Gibbs 1956 | Chen 1988 | IS:1498-1970 |
| Bajo | Menor que 18 | 0 a 15 | Menor que 12 |
| Medio | 15 a 28 | 10 a 35 | 12 a 23 |
| Alto | 25 a 41 | 20 a 55 | 23 a 32 |
| Muy Alto | Mayor que 35 | Mayor que 35 | Mayor que 32 |

Nota. Adaptado de Asuri & Keshavamurthy, 2016

La plasticidad en un suelo (Malagón), involucra la acción de las fuerzas de atracción molecular (cohesión) y las de tensión superficial (adhesión); en suelos húmedos la cohesión se realiza en fase líquida entre moléculas,

actuando las moléculas como puentes entre las partículas adyacentes; mientras que la adhesión se comporta como una fuerza que atrae moléculas entre la superficie de la fase sólida y la fase líquida; de hecho: “La plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares que generan los campos, que actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua” (Atterberg, Terzaghi y Goldschmidt), (Cap. 1); así cuando el índice de plasticidad baja, no existe peligro de amasamiento del suelo, al contrario si el índice de plasticidad se incrementa aumenta el peligro de que las condiciones físicas de la estructura se vean afectadas, más aún si se trabaja en suelos cuyo contenido de humedad es elevado. El índice de plasticidad (IP) se puede calcular como sigue:

Índice de Plasticidad del Suelo (%) = Lím. Líquido del Suelo (%) - Lím. Plástico del Suelo (%).

Si no se puede determinar el límite líquido o el límite plástico, o resulte negativa la diferencia, el índice de plasticidad sería No Plástico (Guerra, 2018).

2.2.2.1. Ensayo diferencial de expansión libre o índice de expansión libre (IEL) (Norma basada en el IS:2720 1977)

En este método, que es un método de práctica estándar especificado por la Oficina de Normas de la India (ver Tabla 3), la masa seca inicial del suelo que se tomará para la prueba es de 10 g. En este método, el índice de expansión libre es definido por la siguiente ecuación:

$$FSI (\%) = \frac{Vd - Vk}{Vk} \times 100$$

Donde Vd y Vk son volúmenes de sedimento en equilibrio de 10 g de muestra que ha sido secada en un horno, y pasadas por un tamiz de 425 μm colocadas en probetas de vidrio graduadas de 100 ml que contienen

agua destilada y querosene respectivamente, después de un período de equilibrio, como mínimo de 24 h (Asuri & Keshavamurthy, 2016).

Tabla 3

Clasificación de suelos expansivos basados en IEL (IS 1498 1970)

| Potencial de hinchamiento | IEL % |
|---------------------------|---------------|
| Bajo | Menor que 50 |
| Medio | 50 a 100 |
| Alto | 100 a 200 |
| Muy alto | Mayor que 200 |

Nota. Adaptado de Asuri & Keshavamurthy, 2016

Ensayo diferencial de expansión libre o índice de expansión libre (IEL) (Norma basada en el INVIAS E-132 2012)

El índice de expansión libre es el aumento de volumen que sufre un suelo sin restricciones externas, cuando se sumerge en agua; el procedimiento menciona: una porción de suelo se mezcla completamente haciéndolo pasar por el tamiz N°40 (425µm) y una vez secado en el horno, seleccionamos dos muestras de 10 g cada una. **Nota 1: para suelos de alta expansividad, como la bentonita, seleccionamos una muestra de 5 g, o como alternativa, usamos una probeta de 250 ml seleccionando solo 10 g de muestra,** a continuación, colocamos la muestra en una probeta de 100 ml de capacidad, luego llenamos una probeta con tetracloruro de carbono y la otra con agua destilada, hasta los 100 ml. **Nota 2: Como el tetracloruro de carbono es un líquido no polar, el suelo depositado en la probeta no producirá expansión alguna al contacto con el líquido.** Con una varilla de vidrio removemos el aire contenido en las probetas permitiendo que las muestras se asienten, dejando reposar

las probetas por lo menos durante 24 horas para que el suelo depositado logre equilibrarse volumétricamente (ver Figura 12).

Figura 12

Ensayo diferencial de expansión libre o índice de expansión libre (IEL)



Se registra el volumen alcanzado por el suelo en cada probeta y se calcula el (IEL) índice de expansión libre de acuerdo a la siguiente expresión:

$$IEL (\%) = \frac{V_a - V_t}{V_t} \times 100$$

Donde V_a = Volumen de muestra, registrada en la probeta con agua destilada; V_t = Volumen de muestra, registrada en la probeta con tetracloruro de carbono.

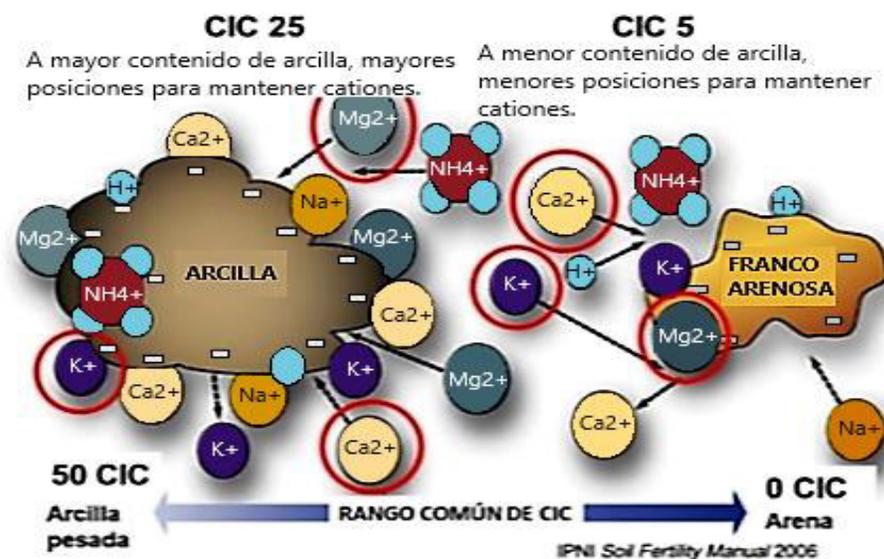
2.2.3. Capacidad de intercambio catiónico

Esta propiedad, que se define simplemente como “la suma total de los cationes intercambiables que puede absorber un suelo” se puede determinar con bastante facilidad. En los métodos comunmente usados, todos los cationes adsorbidos en un suelo se reemplazan por un ion

común, como bario, potasio o amonio, y luego se determina la cantidad de bario, potasio o amonio adsorbido (ver Figura 13).

Figura 13

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)



Nota. Adaptado del IPNI, 2006

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es expresada en términos de miliequivalentes por 100 g de arcilla, que se indican en forma abreviada por meq /100 g , o por centimoles de carga positiva por unidad de masa (cmol/kg). Si un suelo tiene una capacidad de intercambio catiónico de 10 cmol/kg, 1 kg de este suelo es capaz de adsorber 10 cmol de ion de H^+ , por ejemplo, y de intercambiarlo con 10 cmol de otro ion uni-cargado, como K^+ o Na^+ , o con 5 cmol de un ion con dos cargas, como Ca^{2+} o Mg^{2+} . En cada caso, los 10 cmol de carga negativa asociadas con 1 kg de suelo está atrayendo 10 cmol de cargas positivas, ya sea que provengan de H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , o cualquier otro catión. Esto vuelve a enfatizar el hecho de que los cationes se absorben e intercambian sobre una base químicamente equivalente. Un mol de carga lo proporciona 1 mol de H^+ , K^+ o cualquier otro catión monovalente, $\frac{1}{2}$ mol de Ca^{2+} , Mg^{2+} u otro catión

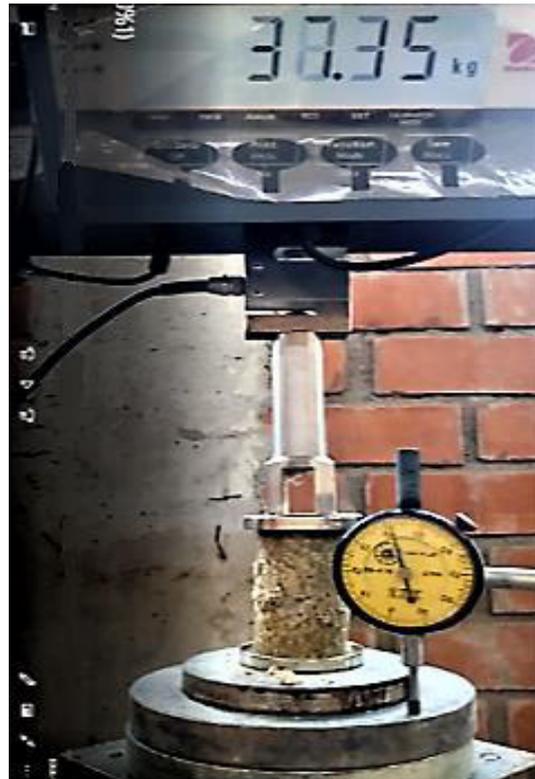
divalente y $\frac{1}{2}$ mol de Al^{2+} u otro catión trivalente. Teniendo en cuenta esta equivalencia química, es fácil expresar el intercambio catiónico en términos prácticos de campo (Brady, 1984).

2.2.4. Resistencia a la compresión simple

El ensayo de compresión simple en suelos, es apto para evaluar muestras de suelos cohesivos de consistencia media, firme o muy firme, inalteradas o poco alteradas, así como suelos cohesivos recompactados (ver Figura 14).

Figura 14

Ensayo de resistencia a la compresión simple (RCS)



Del resultado se obtiene una idea precisa de la resistencia al corte del suelo en condiciones de saturación similares a las del ensayo (ver Tabla

4). No obstante, en arcillas con síntomas de fisuración el resultado puede ser impreciso; es recomendable cuando se realice este ensayo, previamente determinar en cada probeta la densidad seca y su humedad; así, una resistencia al corte sin drenaje (C_u) de arcilla saturada vendrá dada por la expresión:

$$C_u = \frac{\sigma_1}{2}, \text{ siendo } \sigma_1 = \frac{P}{A}$$

P= Presión aplicado al espécimen; A= Área del espécimen (Guerra, 2018).

Tabla 4

Escala de calificación de la resistencia a compresión simple de los suelos arcillosos

| Consistencia | Identificación manual | Resistencia a compresión simple (kN/m ²) |
|--------------|---|--|
| Dura | Difícil de marcar con la uña del pulgar. | >40 |
| Muy rígida | Se puede marcar con la uña del pulgar. | 20 - 40 |
| Rígida | Se puede deformar con la presión (fuerte) del pulgar. | 10 - 20 |
| Media | Se moldea con dificultad. | 5 - 10 |
| Blanda | Se moldea con facilidad. | 2.5 - 5 |
| Muy blanda | Se deshace entre los dedos. | <2.5 |

Nota. De Guerra, 2018

2.2.5. Estabilización o mejoramiento del suelo

El mejoramiento del suelo también es denominado estabilización del suelo por muchos ingenieros geotécnicos. Este es un proceso de alteración de las propiedades de ingeniería del suelo in situ o tomado a un costo más bajo y con mejor control de calidad. Las técnicas de mejora del suelo se pueden colocar en dos categorías principales: (1) la estabilización química y (2) la estabilización mecánica. La estabilización química implica la aplicación de aditivos químicos para mejorar el comportamiento de los suelos. Se utiliza para mejorar la manejabilidad del suelo, haciendo el material más fácil de usar como material de construcción. También se usa para reducir la plasticidad y el potencial de expansión-contracción. Si las arcillas son dispersivas, se utiliza para flocular las partículas. Cuando las arcillas son difíciles de compactar, se pueden añadir productos químicos para dispersar ligeramente sus partículas y ayudar en el proceso. La estabilización mecánica implica metodologías que mejoran las propiedades de ingeniería de los suelos seleccionados sin la adición de agentes u otras energías de unión de partículas. En otras palabras, no hay efectos químicos o de unión incluidos en esta metodología (Braja, 2015).

2.2.6. Estabilización química de los suelos

Estabilización con cal

En ocasiones se utilizan aditivos para estabilizar los suelos en campo, particularmente los suelos finos. Los aditivos más comunes son cal, cemento y cenizas volantes (ver Figura 15).

Figura 15*Estabilización con cal**Nota.* De IECA (s.f.)

Como efectos de la estabilización de suelos con cal se pueden considerar: la modificación del suelo, la aceleración de la construcción, el mejoramiento de la fuerza y su durabilidad. Se pueden utilizar cantidades de cal para la estabilización del suelo en el orden de 5 a 10%; la adición de cal al suelo genera reacciones de intercambio catiónico y floculación-aglomeración; en estas reacciones existen cationes monovalentes asociados con las arcillas los cuales son sustituidos por los iones de calcio divalentes, produciendo también un cambio en la textura de las arcillas (Braja, 2015).

Estabilización con cemento

El cemento se usa cada vez más como agregado para la estabilidad de suelos, sobre todo en la construcción de presas de tierra y carreteras, así como en suelos arcillosos y arenosos (ver Figura 16).

Figura 16*Estabilización con cemento**Nota.* De IECA (s.f.)

Similar a la cal, el cemento contribuye a descender el límite líquido y a elevar el índice de plasticidad de los suelos arcillosos; su eficacia de estabilidad en suelos arcillosos se restringe a límites líquidos menores de 45 a 50 e índices de plasticidad menores a 25; el cemento también contribuye al aumento de la resistencia y la fuerza del suelo en combinación con el tiempo de curado; los suelos arcillosos y granulares de reducida plasticidad son los más asequibles para ser estabilizados con cemento. Las variedades de arcillas ricas en calcio son más proclives a su estabilización con cemento, a diferencia de las arcillas ricas en sodio e hidrógeno, más expansivas, que se estabilizan mejor con la adición de cal (Braja, 2015).

2.2.6.1. Estabilización con ceniza volante

Estas son subproductos generados por la combustión de carbón, asociadas con las plantas de energía eléctrica; las cenizas volantes se componen de gránulos muy finos constituidos de alúmina, sílice y diversos

óxidos y alcalis; la ceniza volante es puzzolánica en la naturaleza y puede reaccionar con cal hidratada para generar productos cementosos; por esa razón las mezclas de cal y cenizas volantes se pueden utilizar para estabilizar las bases y sub-bases de carreteras; mezclas eficaces pueden ser preparadas con 10 a 35% de cenizas volantes y de 2 a 10% de cal; las mezclas de suelo-cal-cenizas volantes se compactan en condiciones controladas, con cantidades adecuadas de humedad para obtener capas de suelo estabilizadas (Braja, 2015).

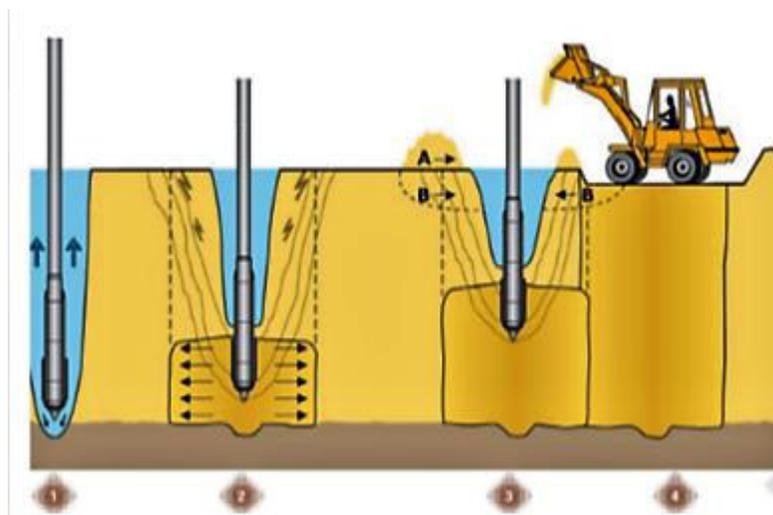
2.2.7. Estabilización mecánica

Vibroflotación

Tiene por objetivo densificar gruesas capas in situ de suelos sueltos granulares (ver Figura 17).

Figura 17

Etapas de ejecución del método de vibroflotación



Nota. De KELLERTERRA (s.f.)

Se desarrolló en Alemania en 1930, siendo USA el primer país que utilizó un dispositivo con estos fines diez años después;

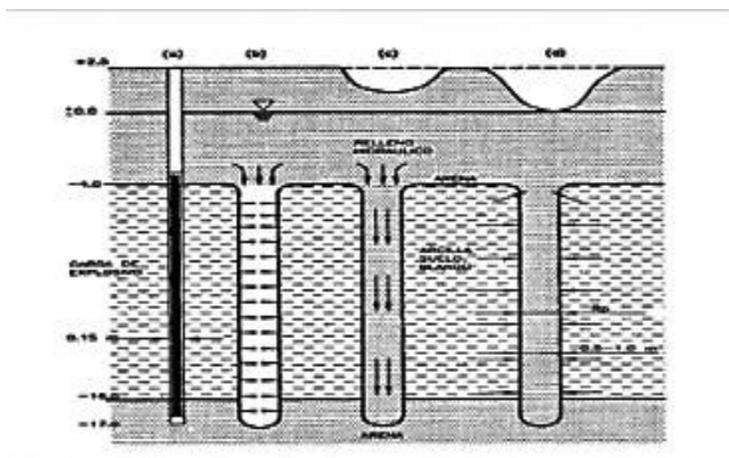
este proceso involucra el uso de una unidad vibratoria, con 2,1 m de largo la cual tiene un peso en su interior de forma excéntrica con capacidad para desarrollar fuerzas centrífugas lo que origina una vibración horizontal, este dispositivo posee aberturas superiores e inferiores para los flujos de agua, estando conectada siempre a una tubería (Braja, 2015).

2.2.7.1. Compactación dinámica

Esta técnica tiene por objetivo densificar o compactar suelos granulares, dejando caer un peso repetidas veces en el suelo a regulares intervalos, utilizando un martillo con peso variable entre 80 a 360 kN, haciéndolo caer desde alturas entre 7,5 y 30,5 m, al caer el martillo se generan ondas de tensión que contribuyen a la densificación; la compactación conseguida en un determinado punto depende: del peso del martillo, la altura de su caída y la distancia de separación de los puntos en que impactó el martillo (Braja, 2015).

2.2.7.2. Blasting

Esta técnica se ha usado en muchos proyectos con marcado éxito (Mitchell, 1970) en la densificación de suelos granulosos, el suelo debe poseer tamaños de grano adecuados que tengan predisposición a la compactación como los requeridos para el método de vibroflotación; el proceso radica en hacer detonar explosivos, como dinamita al 60% a una profundidad determinada de la superficie del suelo (ver Figura 18).

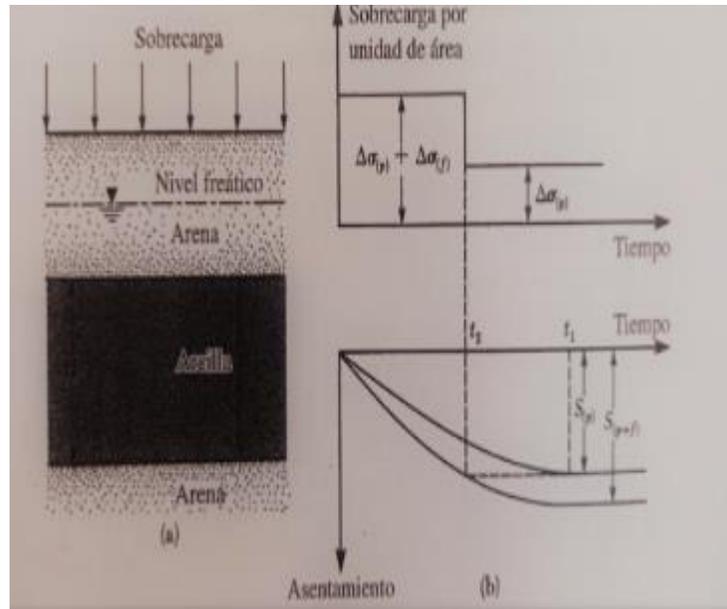
Figura 18*Blasting*

Nota. De Laporte Molina, 2009

La distancia lateral de las cargas oscila entre los 3 a 10 m, por lo general se necesitan de tres a cinco detonaciones para obtener una compactación exitosa, se pueden conseguir compactaciones en densidades relativas del orden de 80% y profundidades aproximadas de 20 m sobre grandes áreas, los explosivos deben colocarse a profundidades de entre las dos terceras partes del espesor de la capa de suelo que se requiere compactar (Braja, 2015).

2.2.7.3. Pre-compresión

Cuando los estratos de suelos arcillosos consolidados normalmente y de alta compresibilidad, ubicados a profundidades limitadas en los que se espera una consolidación de gran asentamiento como efecto de la construcción de carreteras, edificios, presas de tierra o diques, el método de pre compresión puede ser utilizado para minimizar los asentamientos post constructivos (ver Figura 19), (Braja, 2015).

Figura 19*Principios de pre-compresión*

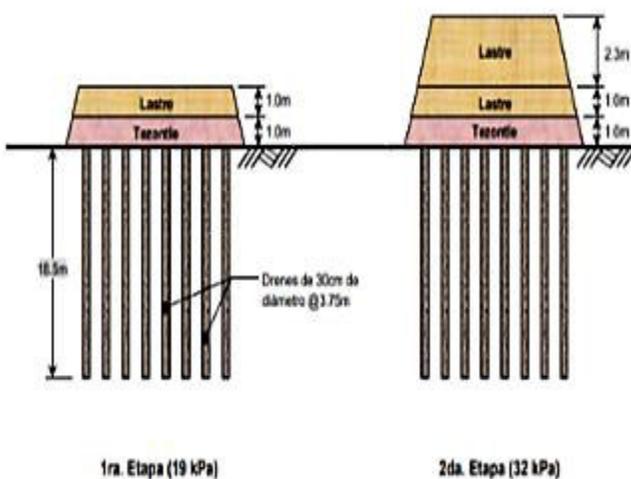
Nota. De Braja, 2015

Drenes de arena

Otra forma de acelerar los asentamientos de los estratos de arcilla blanda a consolidar y obtener su pre compresión previo a la construcción de los cimientos es usando drenes de arena (ver Figura 20).

Figura 20

Drenes de arena



Nota. De Auvinet & Rodriguez (s.f.)

Los drenes de arena se construyen mediante la perforación de agujeros en la(s) capa(s) de arcilla en campo a intervalos regulares. Los orificios están rellenos con arena altamente permeable, y luego se aplica una sobrecarga en la superficie del suelo. Esta sobrecarga aumenta la presión de poros en la arcilla. El exceso de presión de poros en la arcilla se disipa por el drenaje, tanto vertical como radialmente, a los drenes de arena, lo que acelera el asentamiento de la capa de arcilla (Braja, 2015).

2.3. Marco Conceptual o Glosario

Alabastro

Variedad de yeso y/o calcáreo de textura microgranular, de colores claros, generalmente blanco, bastante translúcido, muy usado en artesanía, en la fabricación de pedestales, pequeñas estatuas y objetos ornamentales; en el Perú es conocido como piedra de Huamanga (Ayacucho), (Dávila, 2006).

Alotropía

Es la propiedad que poseen los elementos de presentarse en más de una forma. Ejemplo: diamante, grafito, carbono (Dávila, 2006).

Anhidrita

Es un mineral cuya fórmula química SO_4Ca corresponde a la del sulfato de calcio anhidro, su cristalización se da en el sistema romboédrico, presentando un aspecto fibroso, raras veces granudo, traslúcido y de color blanquecino (Dávila, 2006).

Cal

Su fórmula química CaO corresponde a un óxido de calcio, término ampliamente usado para designar distintas variedades físicas y químicas de óxidos de calcio como la cal hidráulica, cal hidratada y la cal viva (Hoyos, 2001).

Compactación de suelos

Es el procedimiento artificial de densificar un terreno, mediante la expulsión del aire existente entre sus partículas, haciendo que las mismas estén lo más próximas posibles entre sí. Este proceso se realiza, normalmente, mediante el cambio de contenido de humedad del suelo (adición de agua) y aplicación de energía por medios mecánicos (Guerra, 2018).

Curado

Es un proceso que consiste en preparar un material para su evaluación, análisis o utilización dejándolo reposar en condiciones normalizadas de temperatura y humedad por un tiempo definido (Hoyos, 2001).

Escayola

Se dice a todo yeso de naturaleza industrial y de gran calidad, de grano muy fino, blanco, con una pureza por encima del 87%, y en cuya composición prima el sulfato de calcio y agua en una relación de 2:1, y en menor proporción aljez y anhidrita (E-CONSTRUIR.COM, 2021).

Esmectita

Variedad de montmorillonita (Dávila, 2006).

Estucado

Revestimiento con estuco de una columna, una pared, etc.; yeso blanco en masa y agua, que sirve para hacer y preparar objetos para dorar o pintar (CONSTRUMÁTICA, s.f.).

Exfoliación

Es la propiedad que tienen las rocas de separarse en láminas, en los minerales esta propiedad se denomina clivaje (Dávila, 2006).

Floculación

Se denomina floculación al proceso donde las partículas de un suelo se asocian en coágulos, formando agregados, o masas pequeñas por precipitación (Hoyos, 2001).

Ganga

Minerales y/o rocas que no tienen valor económico (Dávila, 2006).

Marisma

Terreno de nivel bajo y pantanoso, inundable durante las mareas con las aguas del mar, el término marjal es utilizado como su sinónimo (Dávila, 2006).

Permeabilidad

Capacidad de una roca o de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. Medida de la relativa facilidad en que un fluido pasa a través de un material bajo una diferencia de presión dada. La permeabilidad es una característica del material, independientemente de las propiedades físicas del fluido que pasa a través suyo, y es diferente del coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica. La permeabilidad de un material está dada por la velocidad de descarga del fluido con el cual se hace el ensayo, v , el gradiente hidráulico, i , el peso unitario del fluido, γ_w en el caso del agua, y su viscosidad, η , de acuerdo con la ecuación: $K = v \eta / i \gamma_w$
Cf. Coeficiente de permeabilidad (Hoyos, 2001).

Plasticidad

Propiedad de un material que se deforma indefinidamente sin romperse al ser sometido a un esfuerzo que supere un nivel dado. Cf. Elasticidad (Hoyos, 2001).

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Hipótesis y Variables

3.1.1. Hipótesis general

La adición del yeso de Mórrope sí produce efectos de estabilización en los suelos arcillosos expansivos.

3.1.2. Hipótesis específicas

1. Las características geológicas del yeso de Mórrope sí influyen en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.
2. La composición mineralógica del yeso de Mórrope sí se relaciona con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.
3. En cantidades óptimas el yeso de Mórrope sí influye en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.

3.1.3. Identificación de variables

1. Variable independiente:

Yeso de Mórrope.

2. Variable dependiente:

Suelos arcillosos expansivos.

Figura 21*Matriz de operacionalización de variables*

| VARIABLES | DIMENSIÓN | INDICADOR | UNIDAD |
|---|--|---|-----------------------|
| Independiente: Yeso de Mórrope | Características Físicas y Químicas | Límites de consistencia (ASTM D4318) 2005 | % |
| | | Ensayo de índice de expansión libre (Norma INV E-32) | % |
| | | Ensayo de resistencia a la compresión simple, (ASTM D2166) 2000 | Kg/cm ² |
| | | Capacidad de intercambio catiónico (CIC) Método de acetato de amonio. | meq/100 g |
| Dependiente: Suelos arcillosos expansivos | Características Físicas y Químicas | Ensayo de compactación estándar (ASTM D698) 2000 | % - g/cm ³ |
| | | Límites de Consistencia (ASTM D4318) 2005 | % |
| | | Ensayo de índice de expansión libre (Norma INV E-32) | % |
| | | Ensayo de resistencia a la compresión simple, (ASTM D2166) 2000. | Kg/cm ² |
| | | Capacidad de intercambio catiónico (CIC) Método de acetato de amonio. | meq/100 g |

Figura 22

Matriz de consistencia

| YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | | | | |
|---|---|---|------------------------------|---|
| PROBLEMA | OBJETIVOS | HIPÓTESIS | VARIABLES | INDICADORES |
| GENERAL | GENERAL | GENERAL | INDEPENDIENTE | |
| ¿La adición del yeso de Mórrope produce efectos de estabilización en los suelos arcillosos expansivos? | Determinar los efectos que produce el yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la estabilización de los suelos arcillosos expansivos. | La adición del yeso de Mórrope sí produce efectos de estabilización en los suelos arcillosos expansivos. | Yeso de Mórrope | Límites de Consistencia (ASTMD4318) 2005. Índice de Expansión Libre de los Suelos (INVIAS E-132) 2012. Ensayo de resistencia a la compresión simple o no confinada, (ASTM D2166)2000. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) Método de acetato de amonio. Difractografía de Rayos X(DRX) |
| ESPECIFICO | ESPECIFICO | ESPECIFICO | DEPENDIENTE | |
| <p>1. ¿Las características geológicas del yeso de Mórrope influyen en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos?</p> <p>2. ¿La composición mineralógica del yeso de Mórrope se relaciona con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos?</p> <p>3. ¿En qué cantidad el yeso de Mórrope influye en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos?</p> | <p>1. Determinar las características geológicas del yeso de Mórrope que influyen en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.</p> <p>2. Determinar la relación de la composición mineralógica del yeso de Mórrope con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.</p> <p>3. Determinar en qué cantidad el yeso de Mórrope influye en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.</p> | <p>1. Las características geológicas del yeso de Mórrope sí influyen en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.</p> <p>2. La composición mineralógica del yeso de Mórrope sí se relaciona con la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.</p> <p>3. En cantidades óptimas el yeso de Mórrope sí influye en la estabilización de los suelos arcillosos expansivos.</p> | Suelos arcillosos expansivos | <p>Ensayo de compactación estándar, (ASTM D698-00a) 2000.</p> <p>Límites de Consistencia (ASTMD4318) 2005.</p> <p>Índice de Expansión Libre de los Suelos (INVIAS E-132)2012.</p> <p>Ensayo de resistencia a la compresión simple o no confinada, (ASTM D2166)2000.</p> <p>Capacidad de intercambio catiónico (CIC) Método de acetato de amonio.</p> <p>Difractografía de Rayos X (DRX).</p> <p>Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).</p> |

3.2. Tipo y Diseño de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, pues se busca resolver un problema práctico con un margen de generalización limitado; es transversal, con enfoque metodológico cuantitativo, y de acuerdo con la cronología de las observaciones, prospectiva.

El diseño de la investigación es experimental de subtipo cuasi experimental con grupo de control y causal.

3.2.1. Ubicación geográfica de las muestras de yeso utilizado

El yeso utilizado como aditivo para la estabilización de los suelos arcillosos expansivos se extrajo en roca de los yacimientos de la zona de Mórrope, distrito de la Prov. de Lambayeque, distante 48 km de la ciudad de Chiclayo (ver Figura 23), posteriormente fue calcinado, molido y tamizado para su uso.

Figura 23

Ubicación geográfica de la zona de extracción del yeso utilizado



Nota. De GEOCATMIN, 2021

3.2.2. Ubicación geográfica de las muestras de bentonita utilizada

Las muestras de bentonita, que se usaron como suelo arcilloso expansivo, fueron extraídas en roca del paraje Cerro Mocho, distrito de Ignacio Escudero, provincia de Sullana, distante 70 km de la ciudad de Piura (ver Figura 24), las cuales fueron posteriormente molidas y tamizadas para su uso.

Figura 24

Ubicación geográfica de la zona de extracción de la bentonita utilizada



Nota. De GEOCATMIN, 2021

3.3. Unidad de Análisis

El yeso de Mórrope y las bentonitas de Ignacio Escudero.

3.4. Población de Estudio

120 muestras de yeso y bentonita.

3.5. Tamaño de Muestra

20 muestras de yeso y 10 muestras de bentonita.

3.6. Selección de Muestra

Por conveniencia.

3.7. Técnicas de Recolección de Datos

Se realizaron mediante ensayos de caracterización física y mecánica de las muestras. Las muestras de yeso de Mórrope del grupo experimental fueron sometidas previamente a un proceso de calcinación, para la eliminación de las moléculas de agua y luego de molienda; las muestras de bentonita fueron sometidas a un proceso de molienda; una vez obtenidos los finos, tanto de yeso como de bentonita, se redujeron por separado, dividiéndolos en montones circulares, por diámetros en ángulos rectos, en cuatro partes más o menos iguales, eliminando dos cuartos diagonalmente opuestos, y mezclando bien los dos cuartos restantes para obtener una verdadera mitad representativa de las muestras originales. Una parte de los finos de bentonita, fueron sometidos a ensayos de compactación basados en el estándar (ASTM D698, 2000) con la finalidad de determinar su óptimo contenido de humedad en porcentaje y uniformizarlos para los ensayos de resistencia a la compresión simple. Otra parte de los finos de yeso y bentonita aún no tratada, fueron separados para la realización de los análisis de difracción de rayos X y de microscopía electrónica de barrido. A continuación, los finos de yeso se mezclaron con los de bentonita en sus distintos porcentajes, e ingresaron a un período de curado de 15 días, al término del cual se realizaron los ensayos para determinar las variaciones de los parámetros físicos del material expansivo afectado por la sustancia adicionada. Estos ensayos y análisis de laboratorio fueron:

- Límites de consistencia, basados en el estándar (ASTM D4318, 2005). Método del aparato de Casagrande.
- Resistencia a la compresión simple, basados en el estándar (ASTM D2166, 2000).
- Índice de expansión libre (IEL), basado en la norma colombiana (INV E-32).
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC), basado en el método de acetato de amonio.

3.8. Análisis e Interpretación de la Información

Fundamentalmente se analizaron e interpretaron:

1. Difractogramas de rayos X (DRX) de los finos de yeso calcinado y bentonita.
2. Micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) de los finos de bentonita.
3. Las variaciones representativas de los límites de consistencia.
4. Las variaciones de la capacidad de intercambio catiónico (CIC).
5. Las variaciones del índice de expansión libre (IEL).
6. Las variaciones de la resistencia a la compresión simple (RCS).
7. Las cantidades de aditivo con las cuales se obtuvieron las variaciones más representativas.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

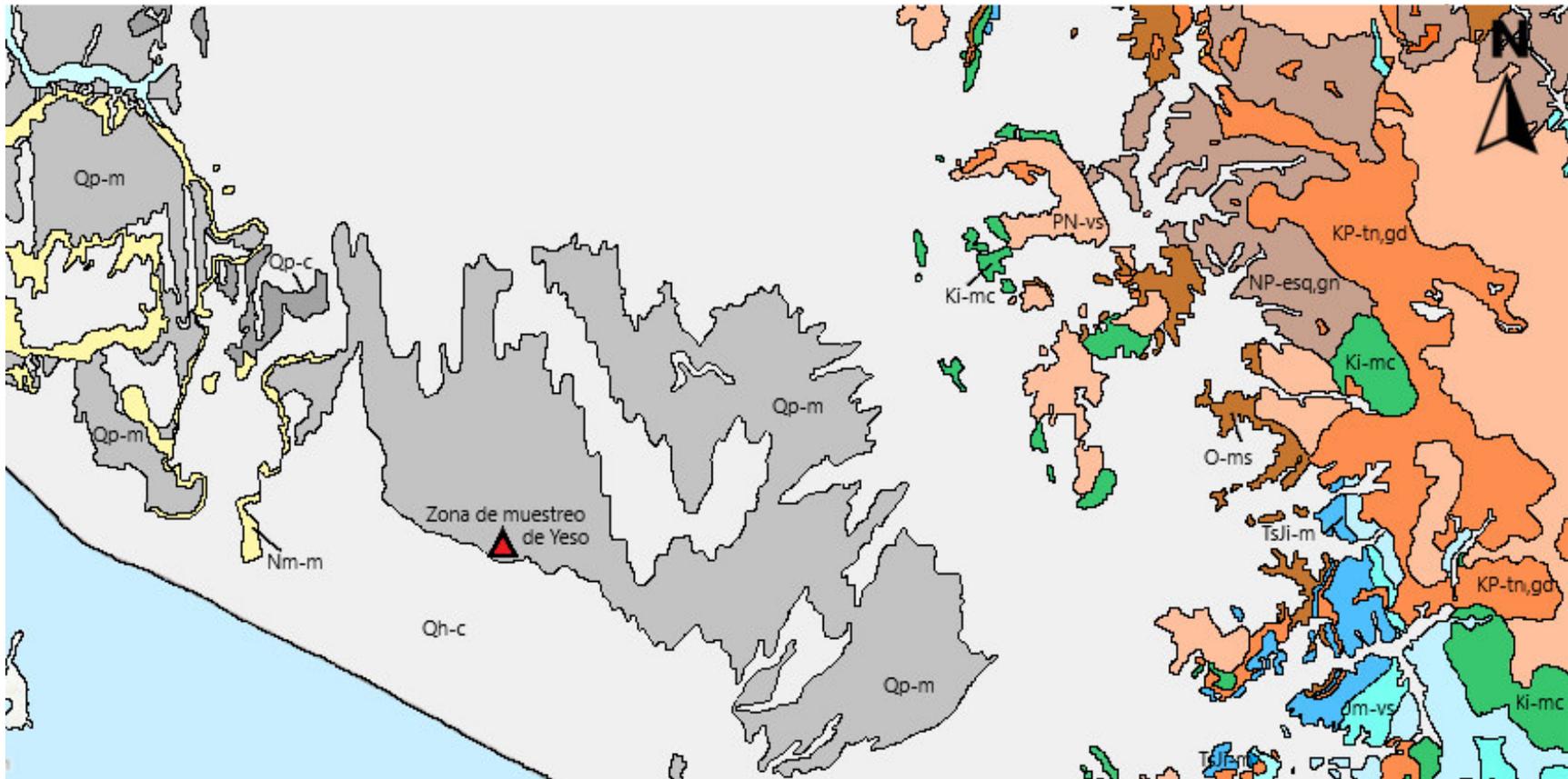
4.1. Análisis, Interpretación y Discusión de Resultados

4.1.1. Geología de los yacimientos de yeso de Mórrope

Los yacimientos de yeso del distrito de Mórrope, de donde se extrajeron las muestras, se ubican geocronológicamente en la era Cenozoica, sistema Cuaternario Pleistoceno Marino, serie reciente (ver Figura 25); desde el punto de vista geomorfológico, se encuentran dentro de una zona de llanura o planicie aluvial (ver Figura 26), según (Caldas et al., 1980) estas zonas son reconocidas también por sus grandes extensiones de superficies llanas y bajas ubicadas entre los tablazos y los cordones litorales, comprendiendo por tanto marismas antiguas y áreas actuales de inundación fluvial; estas llanuras proclives a la inundación presentan una topografía casi plana; algunas cotas se encuentran por debajo del nivel medio del mar, cubiertas por arenas con salitre y la existencia esporádica de lagunas con agua salada; son protegidas de la invasión marina por cordones litorales; las superficies sufren procesos de modificación colmatándose de arenas eólicas; las partes más profundas están conformadas por lodos o arcillas bituminosas grises-negras, mientras que superficialmente son arenas salobres húmedas o costras de arena con caliche; los yacimientos de yeso de esta zona se constituyen pues en materiales de valor económico originados por procesos evaporíticos, producto de la sobresaturación de lagunas y se encuentran cubriendo extensas planicies; presentándose en capas de yeso fibroso (ver Figuras 27 y 28), evidenciando grosores hacia el centro de entre 50 - 60 cm y adelgazamientos laterales entre 10 - 15 cm, lo que modela la sobresaturación de una cuenca lacustre evaporítica.

Figura 25

Mapa geológico parcial de la zona de Salinas y Mórrope indicando el lugar de extracción de las muestras de yeso utilizadas en la investigación

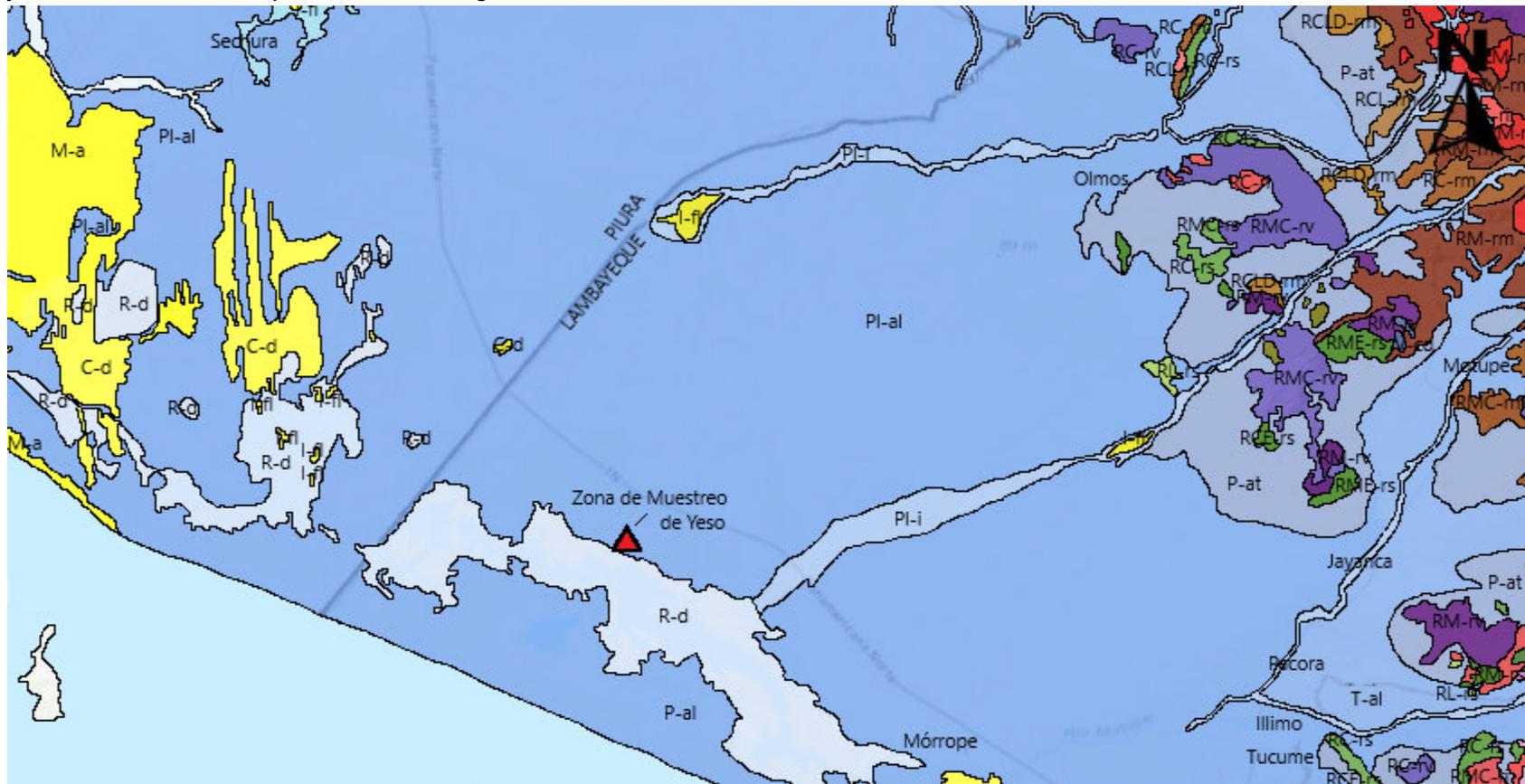


Leyenda: Qp-m= Cuaternario pleistoceno marino; Qh-c= Cuaternario holoceno continental; Nm-m=Cenozoico mioceno marino; Qp-c=Cuaternario pleistoceno continental; Ki-mc= Cretácico inferior marino continental; PN-vs=Paleógeno, Neógeno-vulcanosedimentario; O-ms=Ordoviciano-metasedimentario; TsJi-m= Triásico superior, Jurásico inferior-marino; Jm-vs= Jurásico medio-vulcanosedimentario; NP-esq, gn= Neoproterozoica-esquistos, gneis; KP-tn, gd= Cretáceo, Paleógeno-plutones.

Nota. De GEOCATMIN, 2021

Figura 26

Mapa geomorfológico parcial de la zona de Salinas y Mórrope indicando el lugar de extracción de las muestras de yeso utilizadas en la presente investigación



Leyenda: PI-al= Llanura o planicie aluvial; PI-i= Llanura o planicie inundable; Rd= Relieve depresionado; I-fl= Isla fluvial; RL-rs= Lomada en roca sedimentaria; C-d= Campo de dunas; RME-rs= Montaña estructural en roca sedimentaria; RMC-rv= Montañas y colinas en roca volcánica; RCLD-rm= Colina y lomada disectada en roca metamórfica.

Nota. De GEOCATMIN, 2021

Figura 27

Yacimiento de yeso en Mórrope (Lambayeque)

**Figura 28**

Observación de capas en un yacimiento de yeso en Mórrope (Lambayeque)

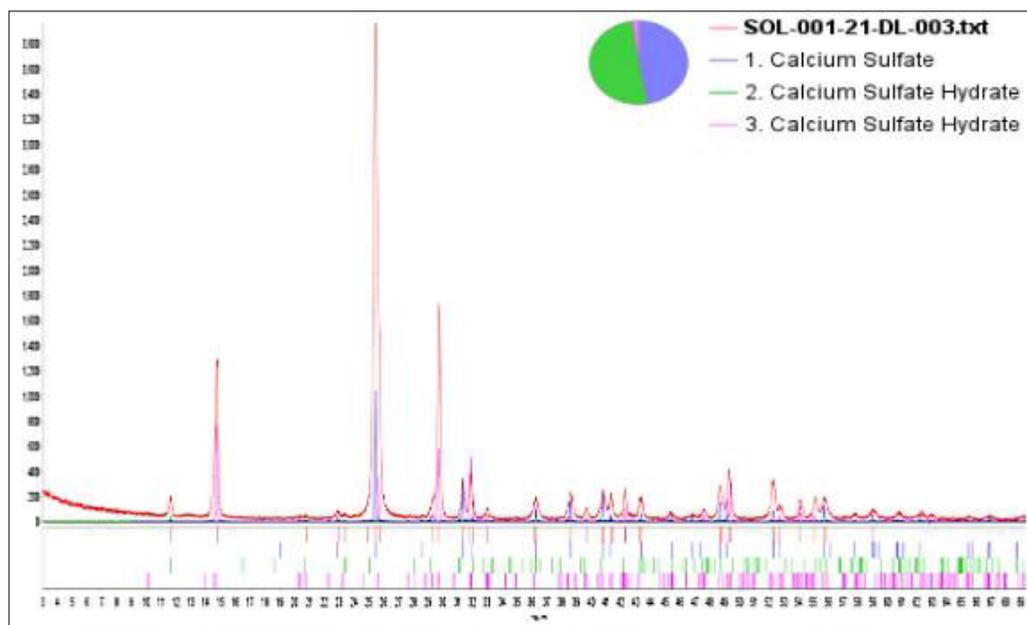


4.1.2. Difractografía de rayos X (DRX)

Se realizaron estudios de difracción de rayos X sobre muestras de yeso en polvo de roca, previamente calcinadas y molidas (ver Figura 29), siendo su composición mineralógica: anhidrita en 56,16%, bassanita en 41,03% y yeso en 2,81% (ver Tabla 5).

Figura 29

Gráfico DRX correspondiente al yeso calcinado usado



Nota. De INGEMMET, 2021

Tabla 5

Composición mineralógica del yeso calcinado usado

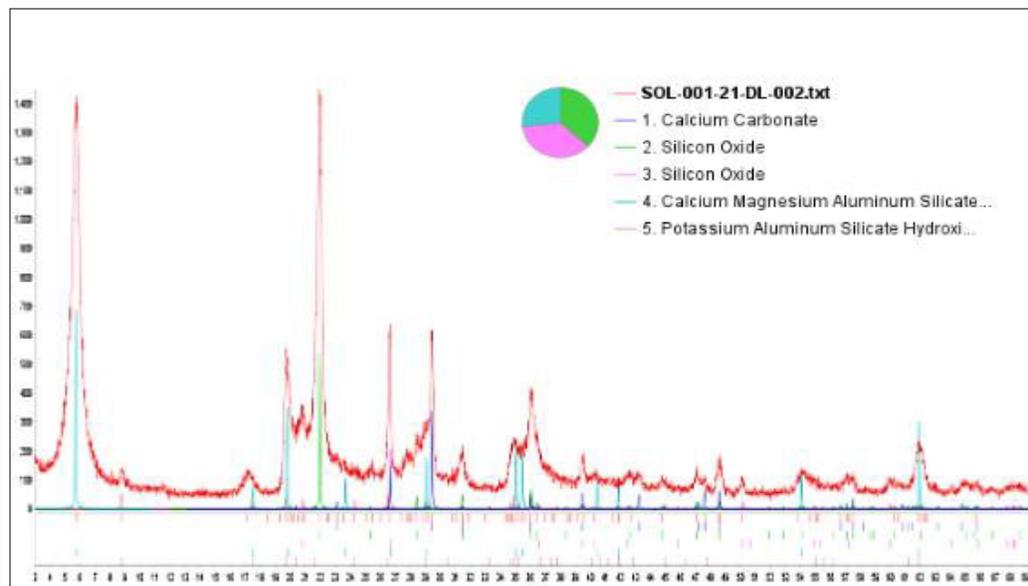
| N° | Mineral | Fórmula | % |
|-----------------------------|-----------|---|-------|
| 01 | Anhidrita | Ca (SO ₄) | 56,16 |
| 02 | Bassanita | Ca (SO ₄) (H ₂ O) _{0.5} | 41,03 |
| 03 | Yeso | Ca (SO ₄) (H ₂ O) ₂ | 2,81 |
| Error Estadístico de Conteo | | 3,1% | |

Nota. De INGEMMET, 2021

El difractograma de la bentonita no tratada (ver Figura 30) muestra predominantemente en su composición: mineral de arcilla tipo montmorillonita en 37,78%; seguido de cristobalita y en menores porcentajes presencia de calcita, cuarzo y moscovita (ver Tabla 6).

Figura 30

Gráfico DRX correspondiente a la bentonita no tratada



Nota. De INGEMMET, 2021

Tabla 6

Composición mineralógica de la bentonita no tratada

| N° | Mineral | Fórmula | % |
|-----------------------------|-----------------|--|-------|
| 01 | Montmorillonita | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ | 37,78 |
| 02 | Cristobalita | SiO_2 | 29,74 |
| 03 | Calcita | $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ | 18,49 |
| 04 | Cuarzo | SiO_2 | 11,25 |
| 05 | Moscovita | $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ | 2,74 |
| Error Estadístico de Conteo | | 5,13% | |

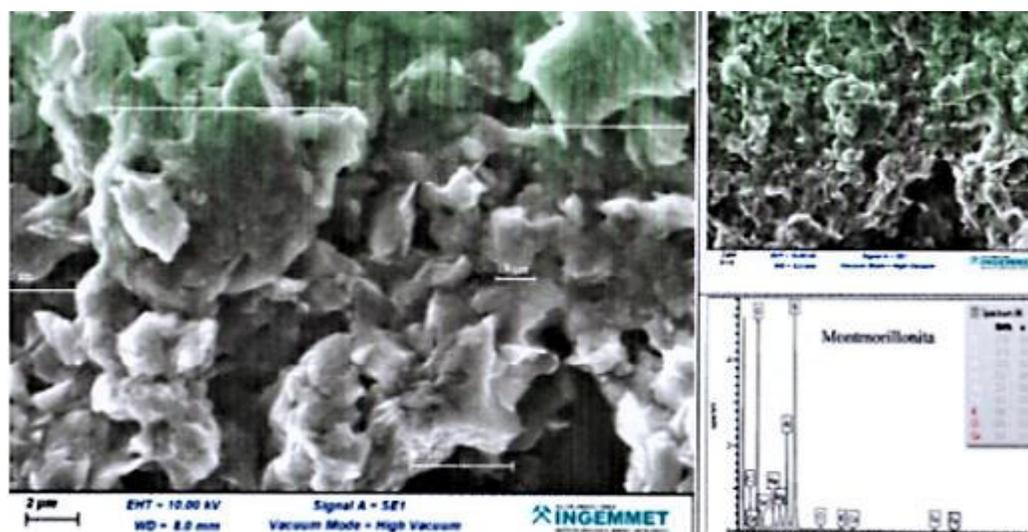
Nota. De INGEMMET, 2021

4.1.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) para muestras de bentonita no tratada, donde se observaron agregados de microcristales de montmorillonita con morfología generalmente laminares arrugadas y hojosas (ver Figura 31), algunos formando microfábricas glomerulares y escamas apiladas, con tamaños que varían desde 2 a 10 μm en promedio. A medida que se incrementa la magnificación hasta 10000x se observa mejor algunas estructuras laminares. Por sectores la muestra presenta en menor proporción agregados microgranulares de halita de formas cúbicas (ver Figura 32), y microcristales de plagioclasas (ver Figura 33). El tipo de arcilla que compone la muestra corresponde a la montmorillonita por su alto contenido en aluminio según se observa en los espectros composicionales del análisis elemental puntual, esta a su vez pertenece al grupo de las esmectitas (INGEMMET, 2021).

Figura 31

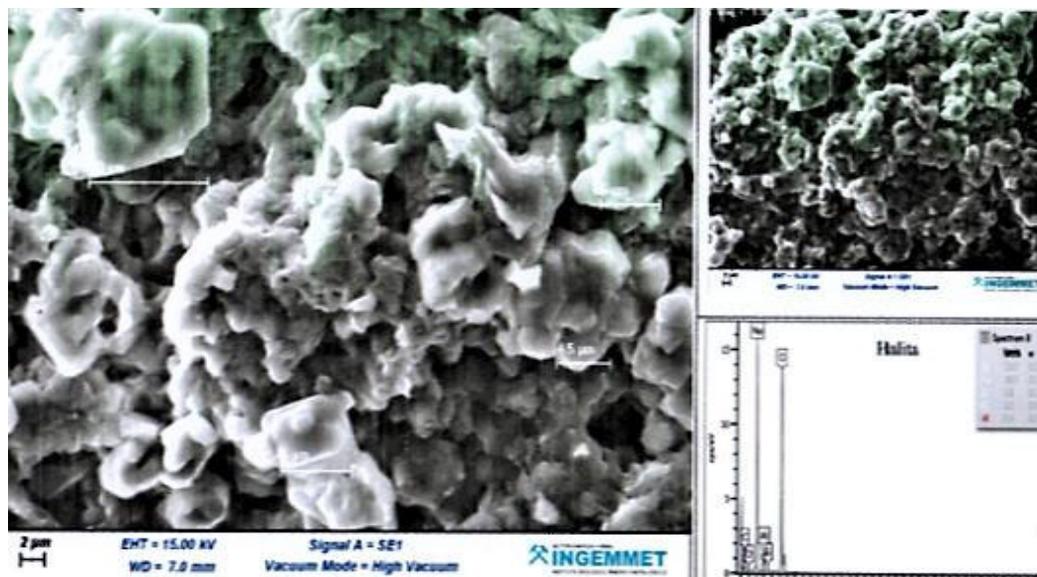
Microcristales de montmorillonita con formas laminares y hojosas en la muestra de bentonita no tratada



Nota. De INGEMMET, 2021

Figura 32

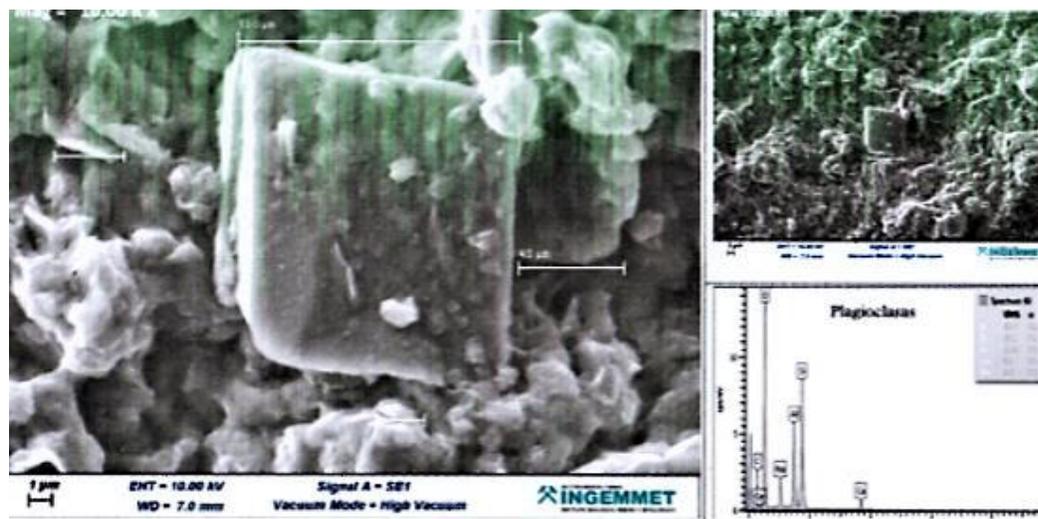
Agregados microgranulares de halita, de formas cúbicas, englobados por agregados de montmorillonita en la muestra de bentonita no tratada



Nota. De INGEMMET, 2021

Figura 33

Microcristales de plagioclasa (andesina) de morfología tabular, recubierto con microescamas de montmorillonita glomerular hojosa en la muestra de bentonita no tratada



Nota. De INGEMMET, 2021

4.1.4. Distribución de ensayos y proporcionalidad de mezclas

La distribución de los ensayos y proporcionalidad de mezclas para determinar la compactación estándar, resistencia a la compresión simple, índice de expansión libre, límites de consistencia y capacidad de intercambio catiónico se plasman en la Tabla 7.

Tabla 7

Distribución de ensayos y proporcionalidad de mezclas

| Proporcionalidad de mezclas | Yeso 2,5% | Yeso 5% | Yeso 7,5% | Yeso 10% | Yeso 0% | Total ensayos |
|--------------------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|------------------|
| Ensayos | Bent 97,5% | Bent 95% | Bent 92,5% | Bent 90% | Bent 100% | |
| Compactación estándar | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| RCS | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 15 |
| IEL | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 15 |
| Límite líquido | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 20 |
| Límite plástico | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |
| CIC | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| Total | 12 | 13 | 12 | 13 | 14 | 64 |

4.1.5. Compactación estándar

Con la finalidad de conocer el óptimo contenido de humedad que sirva de referencia para las muestras a ensayar en las pruebas de resistencia a la compresión simple, se realizó el ensayo de compactación estándar, basados en la norma internacional, ASTM D-698 (2000), utilizando bentonita no tratada, determinándose su óptimo contenido de humedad en

27,86% y su máximo peso específico seco en 1,27071 g/cm³ (ver Figura 34 y Tabla 8).

Figura 34

Curva de compactación estándar de la bentonita no tratada, mostrando su óptimo contenido de humedad y su máximo peso específico seco

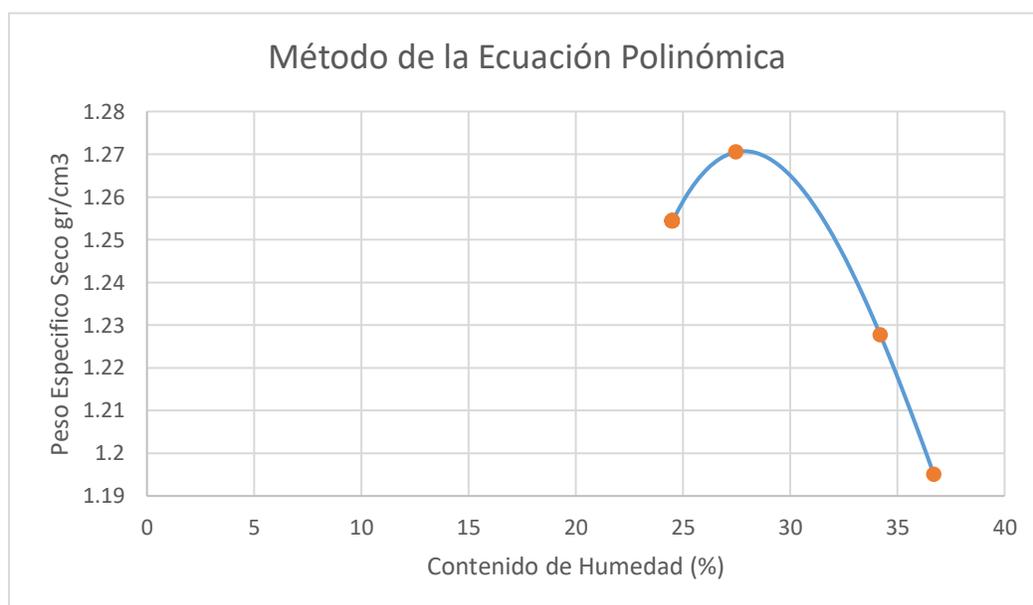


Tabla 8

Resultados de compactación estándar en bentonita no tratada

| | Resultado |
|-----------------------------|---------------------------|
| Óptimo contenido de humedad | 27,86% |
| Máximo peso específico seco | 1,27071 g/cm ³ |

4.1.6. Límites de consistencia

El límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de las muestras se determinaron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D4318 (2005) aplicando el método de multipunto en copa de bronce (aparato de Casagrande); el cambio en límite líquido e índice de plasticidad de la bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso se grafica en la Figura 35; en la Tabla 9 se detallan los valores obtenidos de los límites de consistencia de la bentonita no tratada; y en la Tabla 10, la influencia del contenido de yeso de Mórrope sobre los límites de consistencia de la bentonita. Con la dosificación de 7,5% de yeso de Mórrope en bentonita, se consiguió una reducción máxima del límite líquido de 155,92% a 116,06% y su índice de plasticidad de 121,66% a 88,36%; por encima de esta dosificación de yeso la tendencia es que los límites de consistencia empiezan nuevamente a incrementarse.

Figura 35

Variaciones del límite líquido e índice de plasticidad en las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso

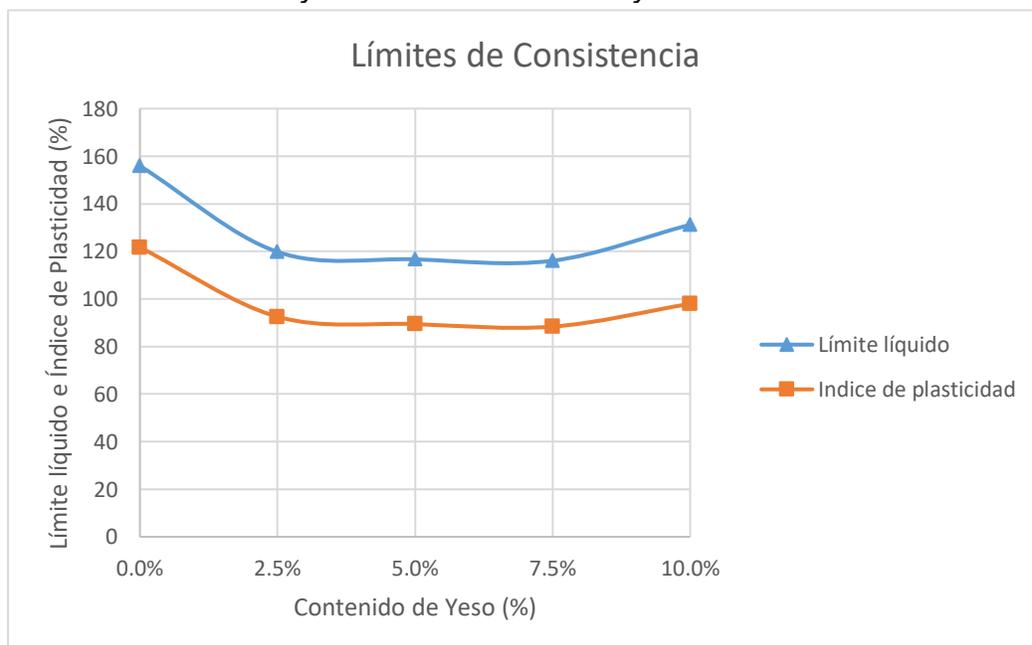


Tabla 9*Límites de consistencia de la bentonita no tratada*

| Propiedad | Valor |
|---------------------------|---------|
| Límite líquido (%) | 155,915 |
| Límite plástico (%) | 34,252 |
| Índice de plasticidad (%) | 121,663 |

Tabla 10*Influencia del contenido de yeso sobre los límites de consistencia de la bentonita*

| Contenido de Yeso | 0% | 2,50% | 5% | 7,50% | 10% |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Límite líquido (%) | 155,915 | 119,767 | 116,636 | 116,059 | 131,19 |
| Límite plástico (%) | 34,252 | 27,248 | 27,226 | 27,697 | 33,234 |
| Índice de plasticidad (%) | 121,663 | 92,519 | 89,41 | 88,362 | 97,956 |

4.1.7. Determinación del índice de expansión libre (IEL)

Con el fin de determinar el porcentaje de expansión de la bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso de Mórrope, se llevaron a cabo pruebas para calcular el índice de expansión libre (IEL) de acuerdo con el estándar colombiano INVIAS E-132 (2012) basado en la norma internacional india IS:2720 (1977) ya descritas en su procedimiento. Los resultados se han recogido en la Figura 36 y la Tabla 11. Estos evidencian que la adición de yeso reduce significativamente el índice de expansión libre de la bentonita no tratada de 685,7% hasta un 166,7%, esta última reducción conseguida con un máximo contenido de 10% de yeso en bentonita.

Figura 36

Variaciones del índice de expansión libre (IEL) en las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso

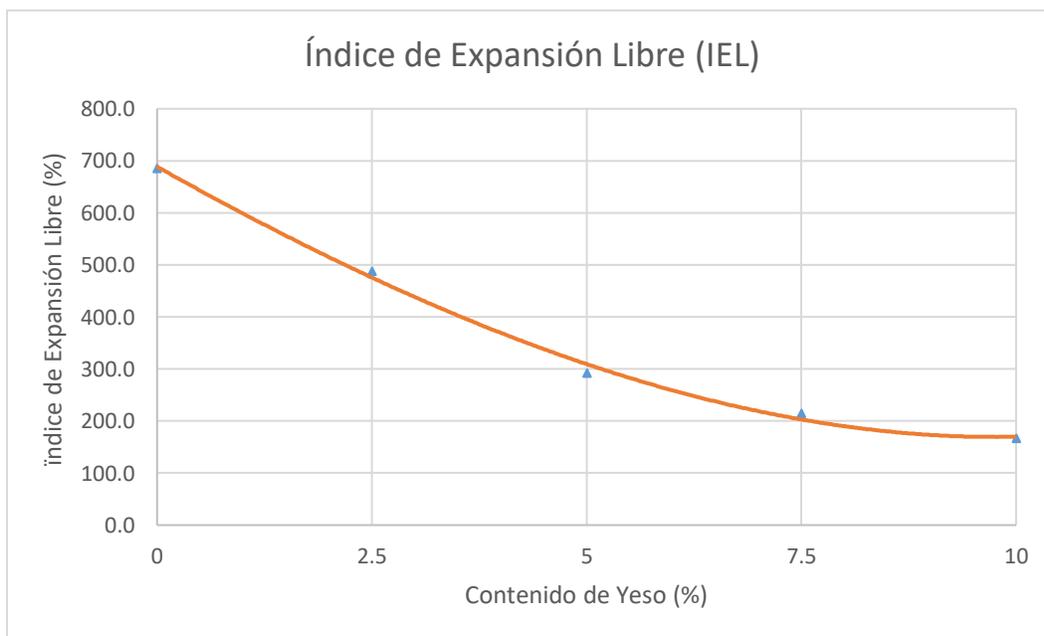


Tabla 11

Influencia del contenido de yeso sobre el porcentaje de expansión de la bentonita

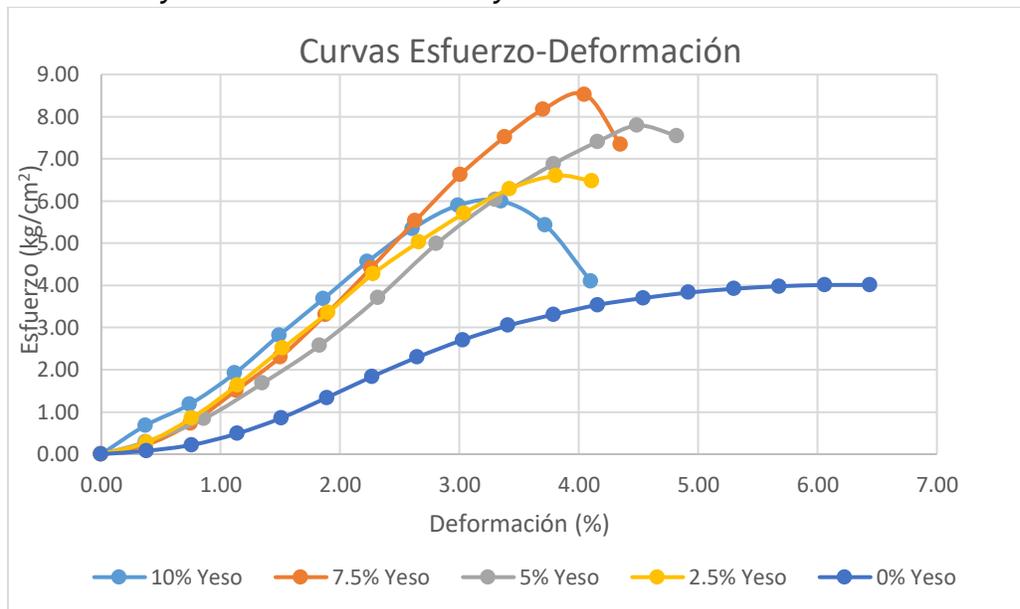
| Contenido de yeso | 0% | 2,50% | 5% | 7,50% | 10% |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Porcentaje de expansión | 685,7 | 487,5 | 291,7 | 214,8 | 166,7 |

4.1.8. Ensayo de resistencia a la compresión simple (RCS)

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión simple en muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso de Mórrope. Estas muestras se prepararon por compactación hasta su óptimo contenido de humedad y su máximo peso específico seco (27,86% y 1,27071 g/cm³). Las muestras se guardaron en bolsas de polietileno dentro de un desecador de vidrio para su curado (15 días). Después del período de curado, se realizaron las pruebas de acuerdo al estándar ASTM D2166 (2000), hasta la falla, bajo una tasa de deformación constante de 1,5 mm/min. Las pruebas se repitieron en tres muestras idénticas, se tomaron lecturas de carga y deformación para cada muestra. Luego de trazar el esfuerzo frente a la deformación (ver Figura 37) se obtuvo el esfuerzo pico como el promedio de los tres valores. Los valores de la resistencia a la compresión simple de la bentonita no tratada y la bentonita tratada con yeso se observan en la Tabla 12. La influencia del yeso en la resistencia a la compresión simple de la bentonita se indica en la Figura 38. Con la dosificación de 7,5% del yeso de Mórrope en bentonita, se consiguió una mejora efectiva máxima de 8,68 kg-f/cm², incrementando la resistencia de la bentonita hasta un 115,92%; por encima de esta dosificación de yeso la tendencia es que la resistencia a compresión simple empieza a decrecer.

Figura 37

Curvas de esfuerzo-deformación obtenidas para muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso

**Figura 38**

Cambios en la resistencia a la compresión simple de las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso

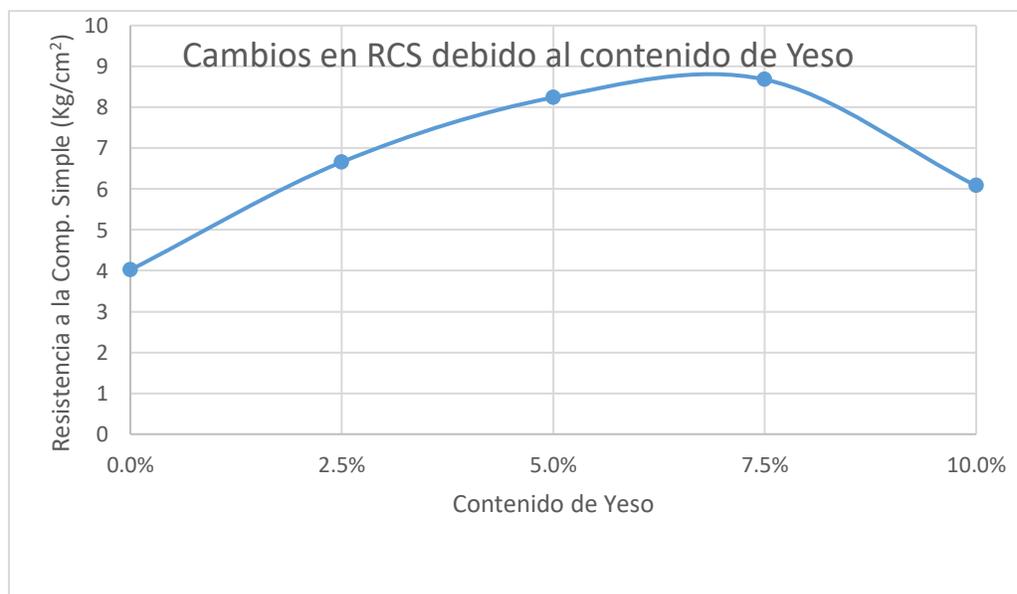


Tabla 12*Influencia del contenido de yeso sobre la RCS de la bentonita*

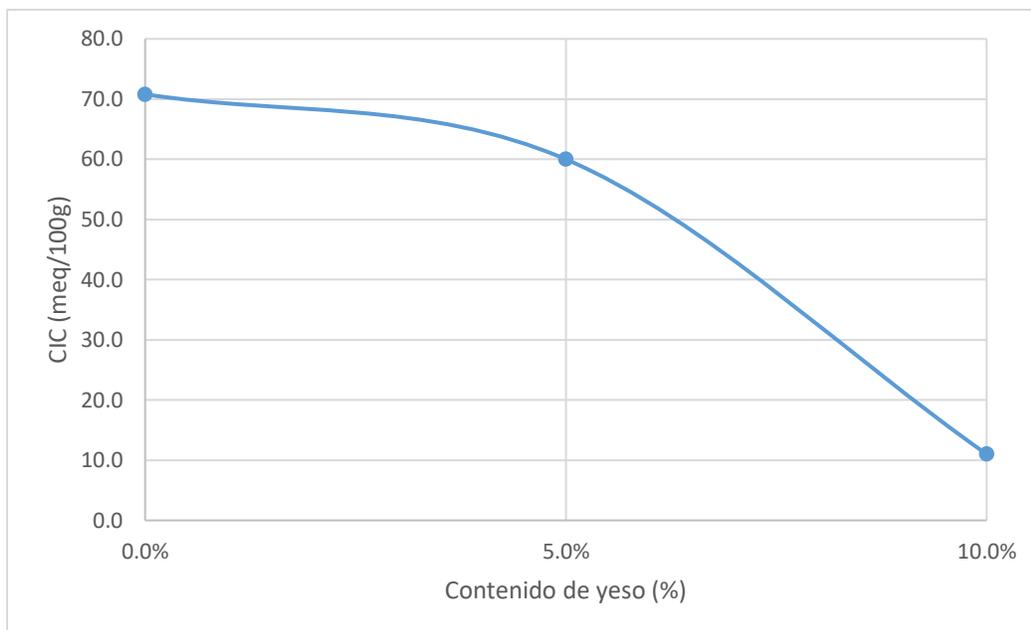
| Contenido de yeso | 0% | 2,5% | 5% | 7,5% | 10% |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| RCS (Kg-f/cm ²) | 4,02 | 6,66 | 8,24 | 8,68 | 6,08 |

4.1.9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El presente ensayo se realizó mediante el método de acetato de amonio (NH₄OAC) usando el NH₄⁺ como catión índice. Este método tiene como base la sustitución de iones de sodio (Na⁺) con iones de amonio (NH₄⁺). En las pruebas realizadas, las muestras se saturaron primero con los iones de sodio y luego se reemplazaron los iones de sodio con iones de amonio mediante la adición de una solución que contenía amonio a un pH de 7. La variación de la CIC en muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso se puede ver en la Tabla 13 y la Figura 39. Los resultados de esta prueba mostraron que la adición del yeso de Mórrope reduce la capacidad de intercambio catiónico (CIC) desde un 70,8 meq/100 g para la bentonita no tratada, hasta un 11 meq/100 g correspondiente a la dosificación de 10% de yeso en bentonita.

Figura 39

Variabilidad de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en las muestras de bentonita no tratada y bentonita tratada con yeso



Nota. De AGQ Labs, 2021

Tabla 13

Influencia del contenido de yeso sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la bentonita

| Contenido de yeso | 0% | 5% | 10% |
|-------------------|------|----|-----|
| CIC (meq/100g) | 70,8 | 60 | 11 |

Nota. De AGQ Labs, 2021

CONCLUSIONES

- Con la adición de yeso de Mórrope, se consiguieron reducciones importantes en la bentonita: límite líquido (-25,56%), índice de plasticidad (-27,37%); índice de expansión libre (IEL) (-75,69%); capacidad de intercambio catiónico (CIC) (-84,46%); y un incremento en la resistencia a la compresión simple de 115,92%. Estas variaciones obtenidas nos indican que el yeso de Mórrope puede usarse como un agregado que estabiliza los suelos arcillosos expansivos.
- Las características geológicas de formación de los yacimientos minerales evaporíticos como los del yeso de Mórrope aquí estudiados, en llanura o planicie aluvial, inundables, de hipersaturación de lagunas, favorecen por precipitación, la concentración en su composición de iones de calcio que sustituyen luego a los iones de la bentonita, generando con ello ventajas aprovechadas para la estabilidad de los suelos arcillosos expansivos.
- La composición mineralógica del yeso calcinado de Mórrope observada en la DRX, establece una relación de intercambio catiónico con las partículas laminares, arrugadas y hojosas, de tamaños que varían entre 2 a 10 μm de la montmorillonita contenida en la bentonita, observadas en el estudio de MEB, características de arcillas que presentan una gran superficie específica; los cationes de calcio liberados por el yeso hacen que las partículas de montmorillonita se floculen, reduciendo su límite líquido e índice de plasticidad; estableciéndose un equilibrio de la carga eléctrica neta de la montmorillonita que contribuye a disminuir su capacidad de intercambio catiónico (CIC) y su índice de expansión libre (IEL); esta interacción yeso-bentonita genera también una reacción química lenta que mejora la resistencia a la compresión simple de la bentonita en función al tiempo de curado, consiguiendo así su estabilización.
- Las cantidades porcentuales, que registraron las mejoras efectivas de la influencia del yeso sobre la bentonita, en los diferentes ensayos realizados para su estabilización, pueden establecer una cantidad de mezcla óptima

de yeso de Mórrope en bentonita de 5%, con un rango de variabilidad de +/- 2,5%; fuera de estos límites el impacto sobre la estabilidad de los suelos arcillosos expansivos se torna menos significativo o se revierte no ameritando la inversión en cantidad del yeso involucrado.

RECOMENDACIONES

- Al aplicarlo en condiciones in situ, el yeso en cantidad adecuada se mezclará con el suelo húmedo para su posterior compactación. Se debe procurar que la mezcla cubra al menos el primer metro de espesor del suelo arcilloso expansivo.
- Hay que verificar el grado de influencia que pueda tener el yeso de Mórrope sobre los acuíferos, relacionada a la posible contaminación del agua subterránea; así como el uso de cemento resistente a los sulfatos para estructuras de concreto cercanas a las zonas de estabilización.
- Los suelos arcillosos expansivos también se pueden estabilizar con cal pura, cal mezclada con fibras de polipropileno, cemento, ceniza volante, cloruro de sodio, geomateriales y escorias granuladas de alto horno; por lo que el uso del yeso de Mórrope como estabilizador estará en función a los costos que su aplicación demande frente a estos otros aditivos y a la evaluación exhaustiva de las ventajas o desventajas que todos ellos reporten según sea la naturaleza del suelo.
- Es importante complementar el presente estudio con ensayos adicionales comparativos, como: la determinación de los límites de consistencia empleando el método del cono, la capacidad de hinchamiento utilizando el edómetro, empleando variedades de yeso y bentonita de distinta composición mineralógica a las utilizadas en la presente investigación, modificando sus rangos porcentuales de mezcla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGQLabs. (2021). *Informe de Ensayo, N° de Referencia S-20/054717*. Lima: AGQLabs.
- AGQLabs. (2021). *Informe de Ensayo, N° de Referencia S-20/054721*. Lima: AGQLabs.
- AGQLabs. (2021). *Informe de Ensayo, N° de Referencia S-21/008667*. Lima: AGQLabs.
- Ashoori, S., Abdideh, M., & Alavi, A. (2016). 3D geostatistical modelling and uncertainty analysis of clay minerals distribution in reservoir rocks. *Geocarto International, Vol.31, No 3.*, 241-255.
- ASTM D2166. (2000). *Método de Evaluación Estándar para Resistencia a la Compresión no Confinada de Suelos Cohesivos D2166-00*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM D4318-05. (2005). *Métodos estándar de ensayo para Límite líquido, Límite plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos*. Conshohocken oeste: ASTM International.
- ASTM D698-00a. (2000). *Métodos de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo utilizando el esfuerzo estándar (12400 lbf-pie/ft³)(600 kN-m/m³)*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Asuri, S., & Keshavamurthy, P. (2016). Expansive Soil Characterisation: an Appraisal. *INAEL Vol.1*, 29-33.
- Auvinet, G., & Rodriguez, J. F. (s.f.). Diseño de Drenes de Arena en Suelos Compresibles Estratificados. *Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Bhattacharja, S., Bhatta, J. I., & Todres, A. H. (2003). Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime- A Critical Review of Literature. *Portland Cement Association-Research & Development Information*.
- Brady, N. C. (1984). *The Nature and Properties of Soils*. New York: Macmillan Publishing Co.

- Braja, D. M. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Cengage Learning Editores S.A.
- Bravo Heredia, P., & Daza Orellana, P. A. (abril de 2019). Métodos para controlar el potencial expansivo en suelos arcillosos de la ciudad de Cuenca. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Bruckard, W. J., & Holmes, R. (2009). Effect of collector, pH and ionic strength on the cationic flotation of kaolinite. *Int. J. Miner. Process*, vol. 93, no.1, 54-58.
- Caldas, J., Palacios, O., Pecho, V., & Vela, C. (1980). *Boletín No 32 : Geología de los Cuadrángulos de Bayóvar, Sechura, La Redonda, Pta. La Negra, Lobos de Tierra, Las Salinas y Mórrope*. Lima: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Castro Cuba Valencia, M. E. (1992). *cybertesis*. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4072>
- CONSTRUMÁTICA*. (s.f.). Obtenido de <https://www.construmatica.com/construpedia/Estucado>
- Dávila Burga, J. (2006). *Diccionario Geológico*. Lima: UNI-ANR.
- Dunin Borkowski, E. (1996). *Minerales Industriales del Perú*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- E-CONSTRUIR.COM*. (2021). Obtenido de <http://e-construir.com/yeso/escayola.html>
- Faraldos, M., & Goberna, C. (2011). *Técnicas de Análisis y Caracterización de Materiales*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Guerra Torralbo, J. C. (2018). *Mecánica de Suelos: Conceptos básicos y aplicaciones*. Madrid: DEXTRA.
- Hiteshkumar, T. R. (2003). *Moisture Diffusion through Neat and Glass-Fiber Reinforced Vinyl Ester Resin Containing Nanoclay*. Morgantown, West Virginia: West Virginia University.
- Hoyos Patiño, F. (2001). *Geotecnia Diccionario Básico*. Medellín: Fabián Hoyos Patiño.

- IECA, A. A. (s.f.). *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal*. Madrid: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- INGEMMET. (2009). Zona de Ocurrencias de Bentonita en el Perú Mapa No3. Lima, Perú.
- INGEMMET. (2021). *Informe Técnico N° 007-2021-INGEMMET/DL-LP*. Lima: INGEMMET.
- INGEMMET. (2021). *Reporte de Resultados No.005-INGEMMET/DL-LRX (CODIGO INTERNO:2021-0020)*. Lima: INGEMMET.
- INVIAS. (2012). *Normas de Ensayos para Carreteras, E-132*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- IPNI. (2006). *Soil Fertility Manual*. IPNI.
- Klein, C., & Hurlbut, C. S. (2001). *Manual de Mineralogía Cuarta Edición Basado en la obra de J.D. DANA*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Laporte Molina, G. (2009). X Congreso Nacional de Geotecnia. *Mejoramiento de Suelos Usando explosivos*. San José, Costa Rica: X Congreso Nacional de Geotecnia.
- Nazzareni, S., Comodi, P., Bindi, L., & Dubrovinsky, L. (2010). The crystal structure of gypsum-II determined by single-crystal synchrotron X-ray diffraction data. *American Mineralogist, Volume 95*, 655-658.
- Ordoñez, J. (2019). Estabilización de Arcillas Expansivas con Geomateriales de la Región. *Pakbal No. 44*.
- Palacios, O., & De la Cruz, N. (1980). Mapa Geológico de los Cuadrángulos de Las Salinas y Mórrope. Hojas 13c-14c. Lima, Perú.
- Pérez Collantes, R. d. (2012). *cybertesis*. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1313/1/perez_cr.pdf
- Quispe Chuquillanqui, W. J. (2020). Estabilización de subrasante de vias en suelos expansivos con cloruro de sodio- Avenida Jacinto Ibarra, distrito de Chilca-Huancayo 2020. Huancayo, Perú: Universidad Continental.
- Sridharan, A., & Prakash, K. (2000). Classification procedures for expansive soils. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng. 143*, 235-240.

- Tauta, J. F., Reyes Ortiz, O. j., Mayorga Antolínez, C., & Méndez G., D. F. (30 de setiembre de 2006). *dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2293118>
- Valle Areas, W. A. (Septiembre de 2010). Estabilización de Suelos Arcillosos Plásticos con Mineralizadores en Ambientes Sulfatados Yesíferos. Madrid, España.
- Velarde del Castillo, A. D. (2015). *Repositorio UNAP*. Obtenido de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2273/Velarde_Del_Castillo_Abel_Darwin.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Zumrawi, M. E., Abdelmarouf, A. O., & Gameil, A. A. (2017). Damages of Buildings on Expansive Soils: Diagnosis and Avoidance. *International Journal of Multidisciplinary and Scientific Emerging Research Vol 6 No 2*.

ANEXOS

Anexo 1. Estudio de Difracción de Rayos X (DRX)
(INGEMMET)

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
 "Año de la Lucha contra la Corrupción y la Impunidad"

DIRECCIÓN DE LABORATORIOS

LABORATORIO DE RAYOS X

**REPORTE DE RESULTADOS N° 005-2021-INGEMMET/DL-LRX
 (CODIGO INTERNO: 2021-0020)**



| | | |
|--|----------------|--|
| | SERVICIO | : 02 ESTUDIOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X |
| | N° DE MUESTRAS | : 2 |
| | SOLICITUD N° | : 001-2021-INGEMMET/DL-ATTIG |
| | PROYECTO | : ATTIG "ASISTENCIA TÉCNICA Y TECNOLÓGICA A LA INVESTIGACIÓN DEN GEOCIENCIAS" |
| | REFERENCIA | : OFICIO N° 00049-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/ UNMSM (Correlativo 000648297) Y CARTA S/N (Correlativo 6631) |
| | SOLICITADO POR | : ING. ROBERTO ZAMORA NEVADO |
| | RESPONSABLE | : ING. LUIS ENRIQUE VARGAS RODRIGUEZ |

San Borja, 11 de mayo de 2021

Ing. ANA LUZ CONDORHUAMAN SUAREZ
 Laboratorio de Rayos X
 Dirección de Laboratorios
 INGEMMET



I. INTRODUCCIÓN

A solicitud del Ing. Roberto Martin Zamora Nevado, se realizaron 2 análisis de difracción de rayos X de acuerdo a la Solicitud N° 001-2021-INGEMMET/DL-ATTIG (Ref. OFICIO N° 00049-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM), obteniéndose 2 difractogramas (1 por cada análisis) identificando las fases cristalinas (minerales) de acuerdo al servicio requerido.

1. Objetivo

Identificar y cuantificar los minerales presentes en las muestras de la solicitud N° 001-2021-INGEMMET/DL-ATTIG, por medio de la técnica de Difracción de Rayos X,

2. Ensayos

2.1 Difracción de Rayos X

La técnica de Difracción de Rayos X por el método de polvo es utilizada para la identificación y cuantificación de fases cristalinas (minerales). Los compuestos sin estructuras definidas (amorfos) no pueden ser estudiados ni cuantificados por esta técnica.

Una forma de expresar la difracción de rayos X en materiales cristalinos es mediante la Ley de Bragg, condición para que una familia de planos paralelos, regularmente separados en un cristal, refleje un haz de rayos X incidente (Fig. 1). Cada material cristalino tiene una estructura atómica característica, por lo tanto, difractarán los rayos X en un patrón característico único, conocido como difractograma o patrón de difracción.

Esta ley es expresada por la relación:

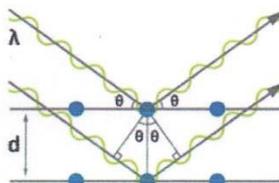


Figura N°1: Reflexión de Bragg mediante planos reticulares d_{hkl} .

$$\lambda = 2d_{hkl}\text{sen}\theta$$

Donde

λ es la longitud de onda de la radiación incidente, 1.5406 Å ya que contamos con tubo de rayos X de Cu

d_{hkl} es el valor de los espaciados reticulares de las fases cristalinas presentes.

$\text{sen}\theta$ es el seno del ángulo de difracción.

Luego de la irradiación de la muestra en polvo con rayos X, en un rango angular de barrido determinado, se obtiene un gráfico llamado difractograma, en donde el eje X son los ángulos de incidencia de la radiación a la muestra (expresado en grados) y el eje Y es la intensidad de la radiación difractada (expresada en cuentas). En el difractograma se presentan picos de intensidad los cuales son producto de una interferencia constructiva producida por los planos reticulares de las fases cristalinas, donde se cumple la ley de Bragg.

Esta técnica como se mencionó anteriormente solo permite identificar y cuantificar estructuras cristalinas (ordenadas), es decir se podrá indicar la presencia de material no estructurado (amorfo). La cuantificación de los minerales presentes en cada muestra es calculada con respecto a la fracción cristalina de la muestra, sin considerar el componente amorfo presente.

3. Condiciones de medición

Se realizó en un difractómetro marca SHIMADZU, modelo XRD-7000, de ánodo de cobre, según las siguientes condiciones:

Tabla N° 01. Condiciones de medición

| Tubo de Rayos X | |
|-----------------------|-------------|
| Tipo de ánodo | Cu |
| Energía | 40 kV, 30mA |
| Condiciones de Medida | |
| Rango de Barrido | 3° - 70° |
| Paso | 0.02° |
| Tiempo por paso | 0.6 s |

II. PROCEDIMIENTO

1.- Irradiación.

Se colocó las muestras pulverizadas a malla -400, en su respectivo portamuestras, para luego introducirlo en el equipo e irradiarlas según las condiciones de medidas mencionadas, por un periodo aproximado de 35 min.

2.- Identificación y Cuantificación.

Para la identificación se utilizó la base de datos PDF4+ versión 2020, y se aplicó el método RIR (Reference Intensity Ratio) para la cuantificación utilizando el software Sieve+ de la ICDD (International Center of Diffraction Data)

3.- Estándar de Referencia Certificado.

Para el análisis de muestras por difracción de rayos X se utiliza el polvo de silicio de código 640e, el cual es un patrón de referencia certificado por National Institute of Standards & Technology (NIST), el cual nos permite verificar la posición y forma de los picos de difracción. Esto nos permite verificar si los goniómetros están calibrados y si los parámetros en el arreglo experimental son óptimos.

Se verificó los siguientes valores de la posición de los picos:

$\lambda=0.15405929$ nm

Tabla N° 03. Valores de posición de picos del estándar de referencia.

| h | k | l | 2 θ |
|---|---|---|------------|
| 1 | 1 | 1 | 28.4 |
| 2 | 2 | 0 | 47.3 |
| 3 | 1 | 1 | 56.1 |
| 4 | 0 | 0 | 69.1 |
| 3 | 3 | 1 | 76.3 |
| 4 | 2 | 2 | 88.0 |
| 5 | 1 | 1 | 94.9 |
| 4 | 4 | 0 | 106.7 |
| 5 | 3 | 1 | 114.1 |
| 6 | 2 | 0 | 127.5 |

| | | |
|---|--|---|
|  | FORMATO | Código : DL-F-164 |
| | REPORTE DE RESULTADOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS "X" | Versión : 03 Fecha aprob. : 11/10/2017 |
| | | Página : 1 de 2 |

| REPORTE N° 005-2021-INGEMMET/DL-LRX | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|------------|---|
| SOLICITUD N° | 001-2021-INGEMMET/DL-ATTIG | REFERENCIA | ATTIG: "ASISTENCIA TÉCNICA Y TECNOLÓGICA A LA INVESTIGACIÓN EN GEOCIENCIAS" |
| SOLICITADO POR | ROBERTO MARTIN ZAMORA NEVADO | | |
| N° DE MUESTRAS | 2 | | |

| | | | |
|------------------------|--------------------|-----------------|----------|
| TIPO DE MUESTRA | Polvo (malla <400) | | |
| ROTACIÓN DE LA MUESTRA | No | VELOCIDAD (rpm) | - |
| TIPO DE ÁNODO | Cu | | |
| DIFRACTOMETRO MARCA | SHIMADZU | MODELO | XRD-7000 |
| VOLTAJE | 40 Kv | CORRIENTE | 30 mA |

| | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------|--------------------|
| ESTUDIO REALIZADO POR | Irvin D. Zumaran Alayza | FECHA | 11 de mayo de 2021 |
|-----------------------|-------------------------|-------|--------------------|

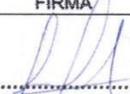
| RANGO DE BARRIDO (2θ) | | | |
|-----------------------|----|-------|-----|
| DE | 3° | HASTA | 70° |

| 01 | CÓDIGO DE MUESTRA | Y-1 | |
|-----------------------------|-------------------|---|-------|
| N° | MINERAL | FÓRMULA | % |
| 01 | Anhidrita | Ca(SO ₄) | 56.16 |
| 02 | Bassanita | Ca(SO ₄)(H ₂ O) _{0.5} | 41.03 |
| 03 | Yeso | Ca(SO ₄)(H ₂ O) ₂ | 2.81 |
| Error Estadístico de Conteo | | 3.10% | |

| 02 | CÓDIGO DE MUESTRA | B-1 | |
|-----------------------------|-------------------|--|-------|
| N° | MINERAL | FÓRMULA | % |
| 01 | Montmorillonita | Ca _{0.2} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O | 37.78 |
| 02 | Cristobalita | SiO ₂ | 29.74 |
| 03 | Calcita | Ca(CO ₃) | 18.49 |
| 04 | Cuarzo | SiO ₂ | 11.25 |
| 05 | Moscovita | KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂ | 2.74 |
| Error Estadístico de Conteo | | 5.13% | |

| | | |
|---|--|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-164 |
| | REPORTE DE RESULTADOS DE ANÁLISIS MINERALÓGICOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS "X" | Versión : 03 Fecha aprob. : 11/10/2017 Página : 2 de 2 |

| |
|---|
| OBSERVACIONES |
| Se envían la data y difractogramas de manera digital junto con el presente informe. |

| | |
|---|--|
| V°B° RESPONSABLE DE LABORATORIO RX | FIRMA |
|  |  <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> Irvin Daniel Zumaran Alayza Laboratorio de Rayos X – Dirección de Laboratorios INGEMMET |

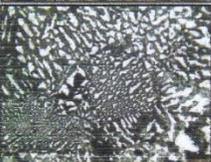
Anexo 2. Estudio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
 "Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia"

DIRECCIÓN DE LABORATORIOS
 LABORATORIO DE PETROMINERALOGÍA

INFORME TÉCNICO N° 007-2021-INGEMMET/DL-LP
 (CÓDIGO INTERNO: 2021-0021)



| | |
|---|---|
|  | SERVICIO : 01 ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO |
|  | N° DE MUESTRA : 01 |
|  | SOLICITUD N° : 002-2021-INGEMMET/DL-ATTIG |
|  | PROYECTO : ATTIG "ASISTENCIA TÉCNICA Y TECNOLÓGICA A LA INVESTIGACIÓN EN GEOCIENCIAS" |
| | SOLICITADO POR : ING. ROBERTO ZAMORA NEVADO |
| | RESPONSABLE : ING. LUIS ENRIQUE VARGAS RODRIGUEZ |
| | REFERENCIA : OFICIO N° 00049-2021-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM (Correlativo 000648297) Y CARTA S/N (Correlativo 6631) |

San Borja, 31 de mayo de 2021

Ing. ANA LUZ CONDORHUAMAN SUAREZ
 Laboratorio de Petromineralogía
 Dirección de Laboratorios
 INGEMMET



Av. Canadá 1470, San Borja - Lima 41, Perú
 Teléfono: (051-1) 618-9800 Fax: (051-1) 225-4540 / (051-1) 225-3063 / (051-1) 476-7010
 E-mail: información@ingemmet.gob.pe
<http://www.ingemmet.gob.pe>

INTRODUCCIÓN

A solicitud de Ing. Roberto Zamora Nevado, se realizó 01 análisis de microscopía electrónica de barrido de material suelto, correspondientes a 01 muestras de acuerdo a la Solicitud N° 002-2021-INGEMMET/DL-ATTIG.

A. DEFINICIÓN DEL SERVICIO:

- ❖ Para realizar el servicio de Microscopía Electrónica de Barrido es importante que se haya realizado estudios preliminares de la muestra de tal manera que el usuario pueda definir el objetivo por el cual la muestra será llevada al microscopio electrónico de barrido (MEB). El MEB utiliza dos modos trabajo para la observación y análisis de muestras, lo cual está ligado al tipo y preparación de la muestra, un modo de trabajo en alto vacío (HV: High vacuum) y el otro modo de trabajo en presión variable (VP: variable pressure). En el modo HV, se trabajan aquellas muestras conductoras, si la muestra no es conductora se tendrá que recubrirla con una fina capa de grafito (C) o de oro (Au) aproximadamente 10nm, lo que permite un mejor análisis de áreas muy pequeñas. En el modo VP, pueden ser analizadas muestras no conductoras.

Los detectores son los que captan las diferentes señales que emite la muestra en la interacción con los electrones.

- ✓ Detector de Electrones Secundarios (SE: Secondary Electron) que permite la visualización a detalle de la superficie en el modo HV. Se observa la topografía de la muestra. Para muestras no conductoras trabajadas en el modo VP, se utilizará un detector de electrones secundarios para presión variable (VPSE: Variable pressure secondary electron).
- ✓ Detector de electrones retrodispersados (BSE: Backscattered electrons), el cual muestra una imagen composicional en niveles de grises lo cual varía de acuerdo al número atómico de la muestra. Cabe resaltar que si la muestra presenta una superficie rugosa puede afectar el contraste de la imagen por lo que una sección delgada-pulida o pulida es mejor para apreciar las imágenes bajo este detector.
- ✓ El espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS: Energy-dispersive X-ray spectroscopy), es un detector que capta los rayos X característicos de un elemento, y brinda información de composición cuyos resultados son cualitativos y semi-cuantitativos. Se puede analizar a través de exploración de punto, línea y mapeo.

| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 1 de 12 |

I. DATOS GENERALES:

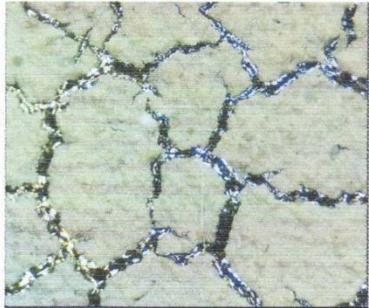
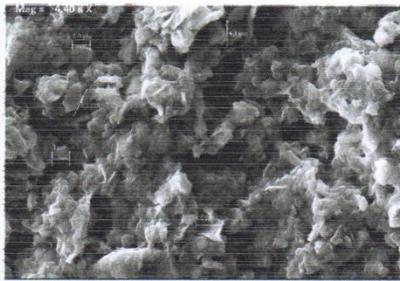
| Código de la muestra | Cuadrángulo | Ubicación en datum WGS84 | | | Localidad y/o paraje |
|----------------------|-------------|--------------------------|--------|------|------------------------------|
| | | Norte | Este | Zona | |
| B-1 | 10b | 9468762 | 508203 | 17 | Cerro Mocho-Ignacio Escudero |

| | |
|-------------------------|---|
| RESPONSABLE DEL ESTUDIO | FIRMA |
| MIGUEL ANGEL COA TITO |  |

II. INFORMACIÓN PRELIMINAR DE LA MUESTRA:**1. OBJETIVO DEL ESTUDIO (Solicitado por el usuario):**

Identificar la presencia de láminas de esmectita y clinoptilolita, longitud de láminas, formas geométricas.

2. UBICACIÓN DE LA MUESTRA**3. ESTUDIO PRELIMINAR (Marcar con X):**

| Fotografía (Estereomicroscopio) | <input checked="" type="checkbox"/> | Imagen (Microscopio electrónico de barrido) |
|---|-------------------------------------|--|
|  | |  <small>2µm EHT = 20.00 kV Signal A = SEI WD = 5.5 mm Vacuum Mode = High Vacuum</small>  |

| | | |
|--|---|--|
|  INGEMMET <small>INSTITUTO GEOLÓGICO, MINERO Y METALÚRGICO</small> | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 2 de 12 |

4. REQUERIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA MUESTRA (Marcar con X):

| | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Recubrimiento por carbón | X |
| <input type="checkbox"/> Recubrimiento por oro | |
| <input type="checkbox"/> No requiere recubrir | |

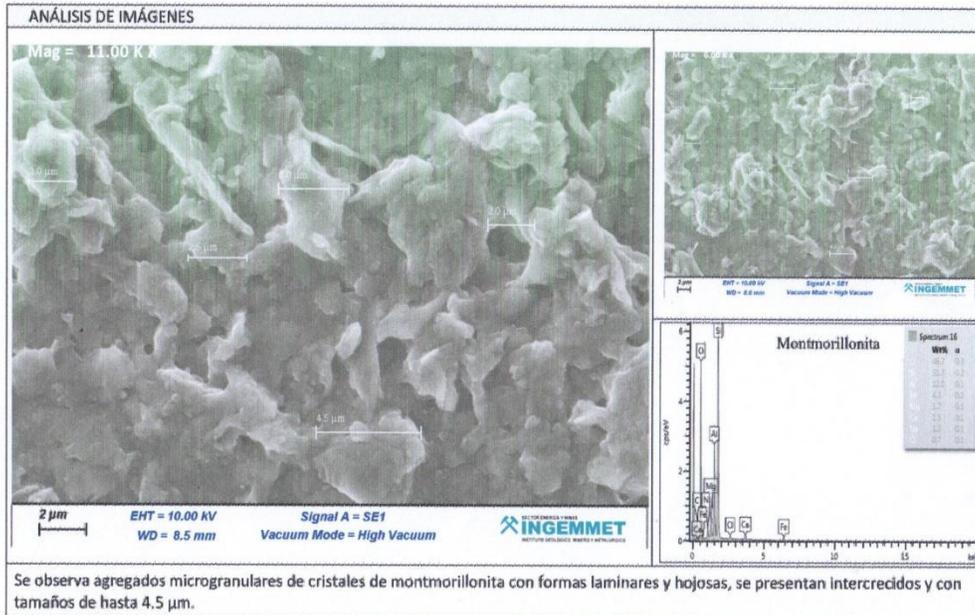
5. MODO DE TRABAJO (Marcar con X):

| | |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Alto vacío (HV) | X |
| <input type="checkbox"/> Presión variable (VP) | |

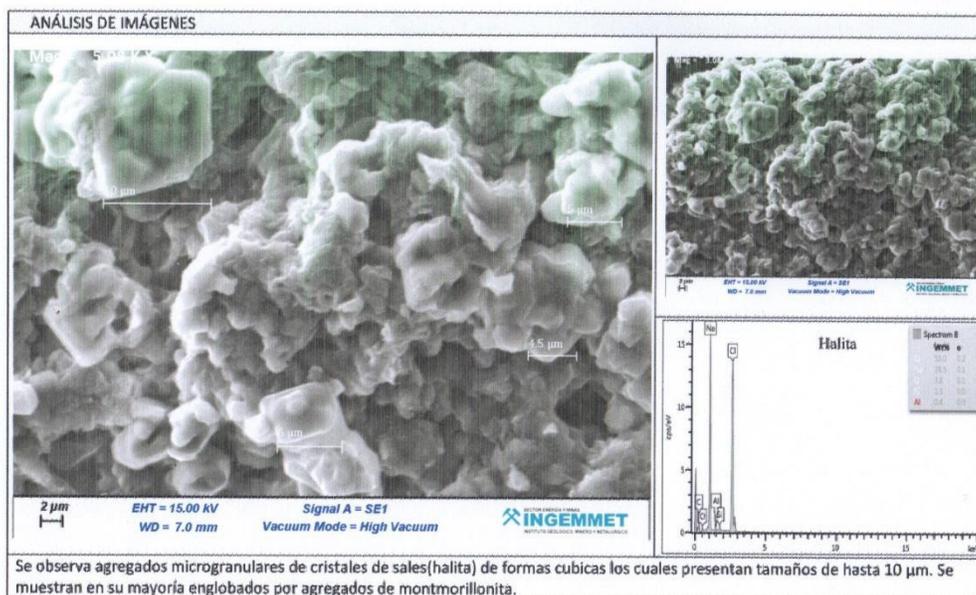
6. DETECTORES UTILIZADOS (Marcar con X):

| | |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Electrones secundarios (SE) | X |
| <input type="checkbox"/> Electrones retrodispersados (HDBSD) | |
| <input type="checkbox"/> Energía dispersiva de Rayos X (EDS) | |
| <input type="checkbox"/> Catodoluminiscencia (CL) | |

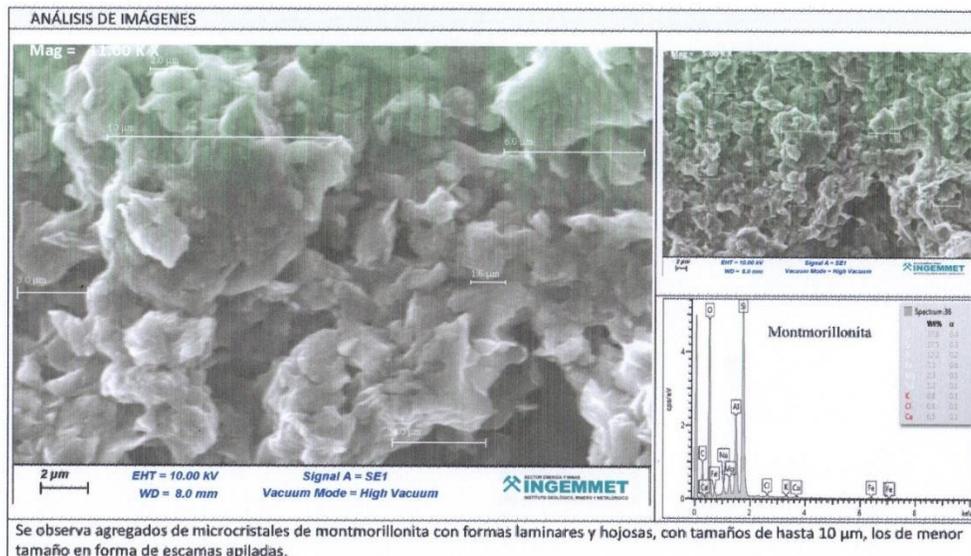
| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 4 de 60 |

7.2. Campo 2

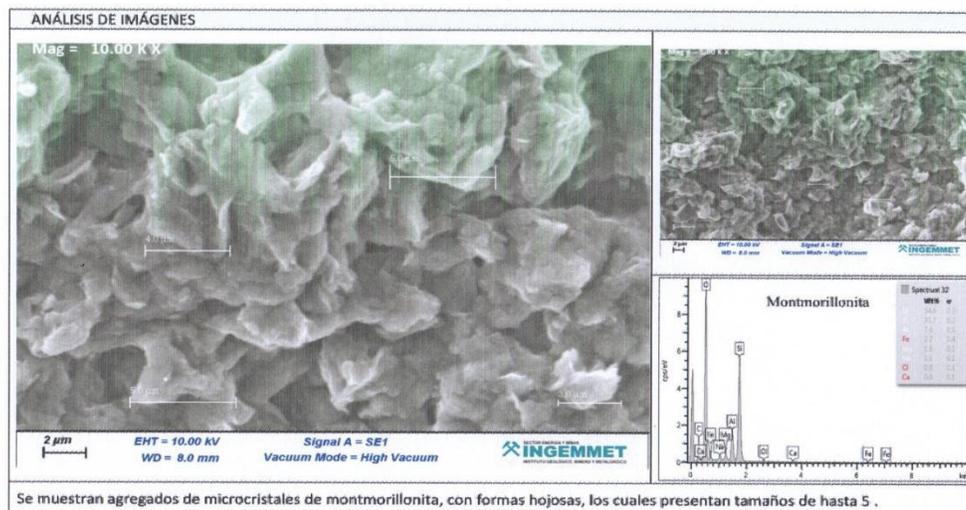
| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 5 de 60 |

7.3. Campo 3

| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 6 de 60 |

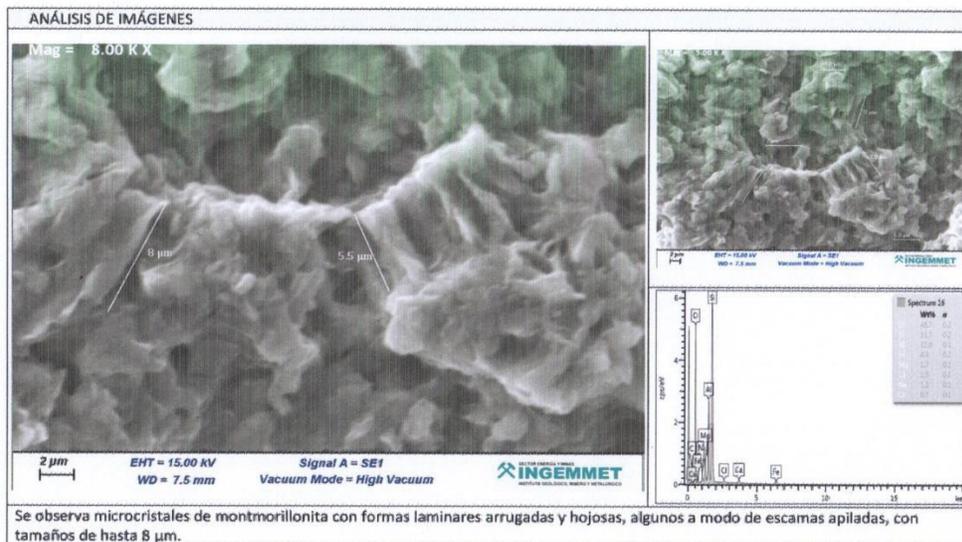
7.4. **Campo 4**

| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 7 de 60 |

7.5. **Campo 5**

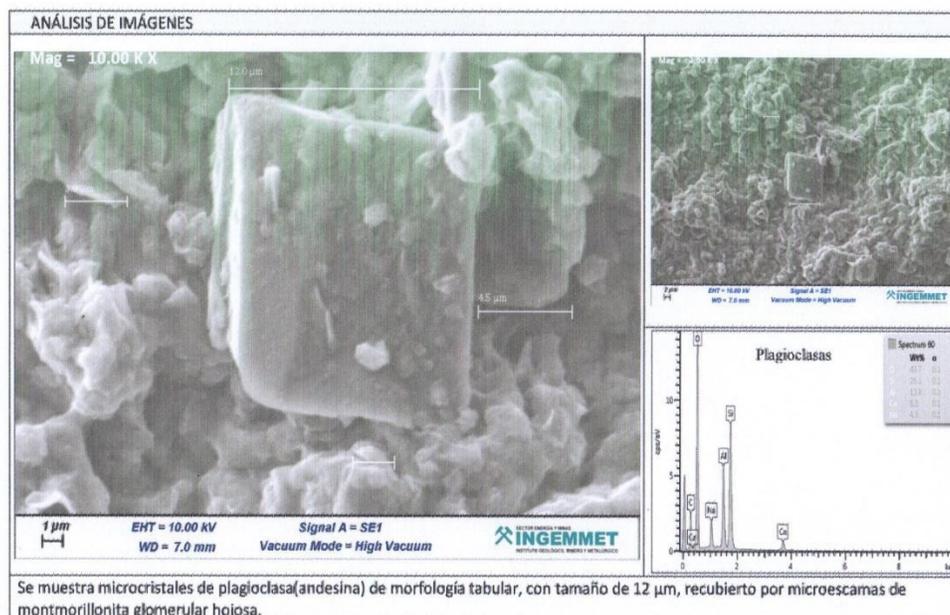
| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 8 de 60 |

7.6. Campo 6



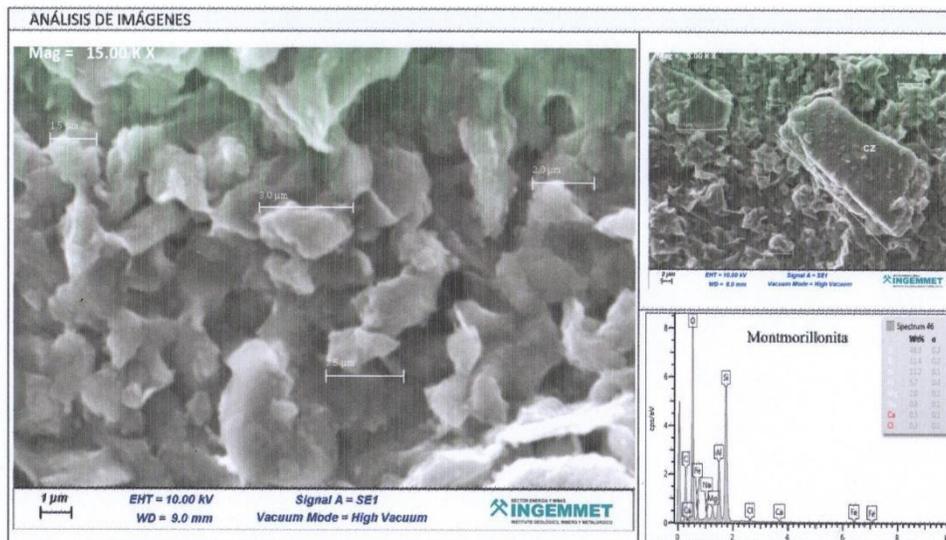
| | | |
|---|---|--|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 9 de 60 |

7.7. Campo 7



| | | |
|---|---|---|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 10 de 60 |

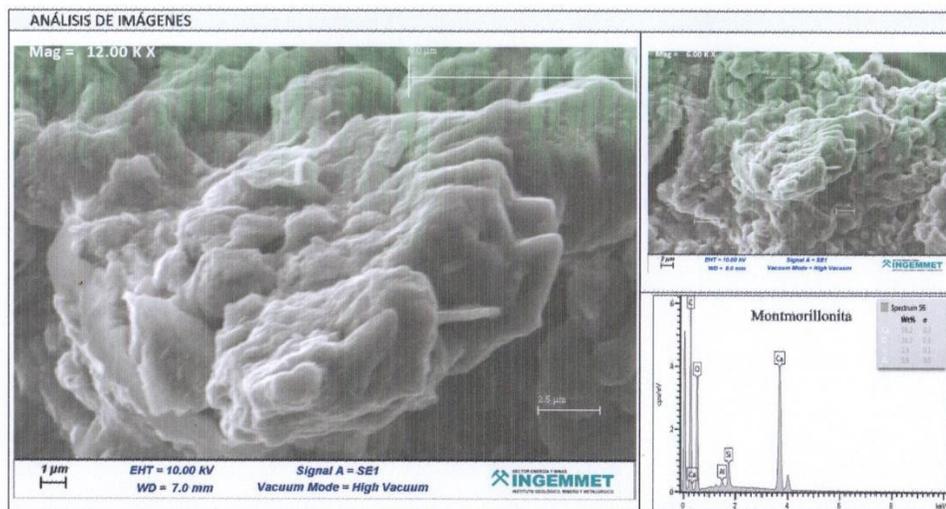
7.8. Campo 8



Se muestra agregados de microcristales de montmorillonita con formas laminares y hojosa, con tamaños de hasta 3 μm. Además, se observa un microcristal de cuarzo con 31 μm de longitud, recubierto por agregados de montmorillonita.

| | | |
|---|---|---|
|  | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 11 de 60 |

7.9. Campo 9



Se observa microcristales de carbonatos (calcita) los cuales presentan formas tabulares apiladas entre sí, con tamaños de hasta 9 μm, se encuentra recubiertas por microagregados de montmorillonita con morfologías laminares arrugada y hojosa, con tamaños de hasta 4 μm.

| | | |
|---|---|---|
|  SECTOR ENERGÍA Y MINAS INGEMMET INSTITUTO GEOLOGICO, MINERO Y METALURGICO | FORMATO | Código : DL-F-059 |
| | ESTUDIO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) | Versión : 01 Fecha aprob.: 23/09/2019 Página : 12 de 60 |

8. CONCLUSIONES:

La muestra corresponde a agregados de microcristales de montmorillonita con morfología generalmente laminares arrugadas y hojosas, algunos forman microfábricas glomerulares y escamas apiladas, con tamaños que varían desde 2 a 10 μm en promedio. A medida que se incrementa la magnificación hasta 10000x se observa mejor algunas estructuras laminares. Por sectores la muestra presenta en menor proporción microcristales de cuarzo, halita, carbonatos, plagioclasas y minerales ferromagnesianos.

El tipo de arcilla que compone la muestra corresponde a la montmorillonita por su alto contenido en Aluminio según se observa en los espectros composicionales del análisis elemental puntual, esta a su vez pertenece al grupo de las esmectitas. Además, no se evidencia la presencia de clinoptilolita.

9. OBSERVACIONES:

Sin observaciones.

Anexo 3. Ensayo de Compactación Estándar

| | |
|----------------|------------------------------------|
| TESISTA | ING. ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. |
| CANTERA: | MÓRROPE |
| FECHA: | 26/10/2020. |
| N° DE MUESTRA: | 1 |

| | | | |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------|
| Tipo de prueba: | Proctor Standard | | |
| Peso del martillo (gr): | 2500 | Altura de caída (cm): | 30.5 |
| N° de capas: | 3 | N° de golpes/capa: | 25 |
| | Volumen del molde (cm ³): | | 932.3 |

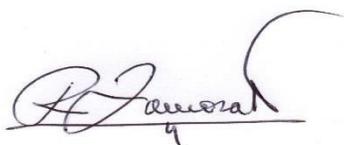
CALCULO DE CONTENIDO DE HUMEDAD

| MUESTRA N° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|---|---|
| Masa de la lata + suelo húmedo | 269.00 | 306.00 | 308.00 | 305.00 | | |
| Masa de la lata + suelo seco | 222.00 | 241.00 | 239.00 | 255.00 | | |
| Masa del agua | 47.00 | 65.00 | 69.00 | 50.00 | | |
| Masa de la lata | 51.00 | 51.00 | 51.00 | 51.00 | | |
| Masa del suelo seco | 171.00 | 190.00 | 188.00 | 204.00 | | |
| contenido de humedad (%) | 27.49 | 34.21 | 36.70 | 24.51 | | |

CALCULO DE PESO ESPECIFICO SECO

| N° DE PRUEBA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|---|
| Masa del suelo + molde (gr) | 5435 | 5461 | 5448 | 5381 | | |
| Masa del molde (gr) | 3925 | 3925 | 3925 | 3925 | | |
| Masa del suelo en molde (gr) | 1510 | 1536 | 1523 | 1456 | | |
| Densidad húmeda (gr/cm ³) | 1.6197302 | 1.6476196 | 1.6336749 | 1.5618061 | | |
| Densidad seca (gr/cm ³) | 1.2705223 | 1.2276382 | 1.1950618 | 1.254364 | | |

| Resultado | |
|--|----------------------------|
| Contenido de humedad óptimo (%) | 27.86% |
| Peso específico seco máximo (kN/m ³) | 1.27071 gr/cm ³ |




LEMS W&C EIRL

WILSON OLAYA AGUILAR
 TÉC. ENSAYOS DE MATERIALES Y SUELOS

Anexo 4. Ensayo Índice de Expansión Libre (IEL)

**DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS (IEL)
(INVIAS E-132 2012)**

Descripción de material: BENTONITA (100%)

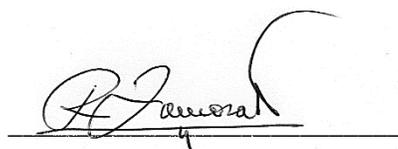
Ensayo realizado por: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO.

Fecha de ensayo: 17/11/20

| Determinación N° | Lectura después de 24 h | | Índice de Expansión Libre % | Índice de Expansión Libre Promedio (%) |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | Tetracloruro de Carbono (ml) | Agua Destilada (ml) | | |
| 1 | 7 | 52 | 642.86% | 685.7 |
| 2 | 7 | 55 | 685.71% | |
| 3 | 7 | 58 | 728.57% | |

Comentarios: Las muestras de BENTONITA fueron extraídas del yacimiento de Cerro Mocho, Distrito de Ignacio Escudero, Provincia de Sullana, Departamento de Piura.

Aprobado por:



Ing. Roberto M. Zamora Nevado

CIP 74841



**DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS (IEL)
(INVIAS E-132 2012)**

Descripción de material: BENTONITA (97.5%) YESO (2.5%)

Ensayo realizado por: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO.

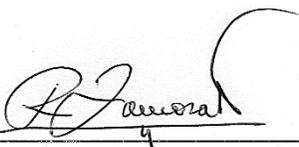
Fecha de ensayo: 17/11/20

| Determinación N° | Lectura después de 24 h | | Índice de Expansión Libre % | Índice de Expansión Libre Promedio (%) |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | Tetracloruro de Carbono (ml) | Agua Destilada (ml) | | |
| 1 | 8 | 43 | 437.50% | 487.5 |
| 2 | 8 | 50 | 525.00% | |
| 3 | 8 | 48 | 500.00% | |

Comentarios: El material ensayado es una mezcla de laboratorio, que contiene 97.5% de BENTONITA Y 2.5% DE YESO.

La Bentonita fue extraída de Cerro Mocho, Dto. Ignacio Escudero, Prov. Sullana, Dpto. Piura y el Yeso fue extraído del Dtto. de Mórrope, Prov. de Lambayeque, Dpto. de Lambayeque.

Aprobado por:



Ing. Roberto M. Zamora Nevado.

CIP 74841



**DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS (IEL)
(INVIAS E-132 2012)**

Descripción del material: BENTONITA (95.0%) YESO (5.0%)

Ensayo realizado por: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO.

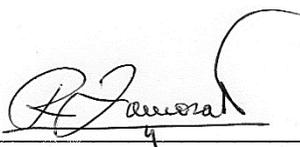
Fecha de ensayo: 17/11/20

| Determinación N° | Lectura después de 24 h | | Índice de Expansión Libre % | Índice de Expansión Libre Promedio (%) |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | Tetracloruro de Carbono (ml) | Agua Destilada (ml) | | |
| 1 | 8 | 31 | 287.50% | 291.67 |
| 2 | 8 | 33 | 312.50% | |
| 3 | 8 | 30 | 275.00% | |

Comentarios: El material ensayado es una mezcla de laboratorio, que contiene 95.0% DE BENTONITA Y 5.0% DE YESO.

La Bentonita fue extraída de Cerro Mocho, Dto. Ignacio Escudero, Prov. Sullana, Dpto. Piura y el Yeso fue extraído del Dtto. de Mórrope, Prov. de Lambayeque, Dpto. de Lambayeque.

Aprobado por:



Ing. Roberto M. Zamora Nevado

CIP 74841



DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS (IEL)
(INVIAS E-132 2012)

Descripción del material: BENTONITA (92.5%) YESO (7.5%)

Ensayo realizado por: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO.

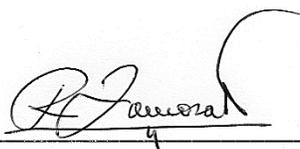
Fecha de ensayo: 17/11/20

| Determinación N° | Lectura después de 24 h | | Índice de Expansión Libre % | Índice de Expansión Libre Promedio (%) |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | Tetracloruro de Carbono (ml) | Agua Destilada (ml) | | |
| 1 | 9 | 27 | 287.50% | 214.81 |
| 2 | 9 | 28 | 312.50% | |
| 3 | 9 | 30 | 275.00% | |

Comentarios: El material ensayado es una mezcla de laboratorio, que contiene 92.5% de BENTONITA Y 7.5% DE YESO.

La Bentonita fue extraída de Cerro Mocho, Dto. Ignacio Escudero, Prov. Sullana, Dpto. Piura y el Yeso fue extraído del Dtto. de Mórrope, Prov. de Lambayeque, Dpto. de Lambayeque.

Aprobado por:



Ing. Roberto M. Zamora Nevado

CIP 74841



DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE EXPANSIÓN LIBRE DE SUELOS (IEL)
(INVIAS E-132 2012)

Descripción del material: BENTONITA (90.0%) YESO (10.0%)

Ensayo realizado por: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO.

Fecha de ensayo: 17/11/20

| Determinación N° | Lectura después de 24 h | | Índice de Expansión Libre % | Índice de Expansión Libre Promedio (%) |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--|
| | Tetracloruro de Carbono (ml) | Agua Destilada (ml) | | |
| 1 | 9 | 25 | 177.78% | 166.67 |
| 2 | 9 | 23 | 155.56% | |
| 3 | 9 | 24 | 166.67% | |

Comentarios: El material ensayado es una mezcla de laboratorio, que contiene 90.0% DE BENTONITA Y 10.0% DE YESO.

La Bentonita fue extraída de Cerro Mocho, Dto. Ignacio Escudero, Prov. Sullana, Dpto. Piura y el Yeso fue extraído del Dtto. de Mórrope, Prov. de Lambayeque, Dpto. de Lambayeque.

Aprobado por:



Ing. Roberto M. Zamora Nevado

CIP 74841



LEMS W&C EIRL
WILSON OLAYA AGUILAR
TÉC. ENSAYOS DE MATERIALES Y SUELOS



HOJA DE SEGURIDAD

CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES, S.A. DE C.V.
 Av. Lincoln No. 3410 Pte. Col. Mitras Norte
 Monterrey N.L. México C.P. 64320.

www.ctr.com.mx
 Conm. (81) 8158 0600
 Info: ctrscientific@ctr.com.mx

TETRACLORURO DE CARBONO

a) SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia química peligrosa o mezcla y del proveedor o fabricante:

1.1 Nombre del producto

Nombre químico: Tetracloruro de carbono

Sinónimos: Tetraclorometano, Tetraclorocarbono

1.2 Otros medios de identificación

CAS No: 56-23-5

Fórmula Química: CCl₄

Peso Molecular: 153.8 g/mol

1.3 Uso recomendado de la sustancia química peligrosa o mezcla, y restricciones de uso

Uso general Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina

1.4 Datos del proveedor o fabricante

CONTROL TÉCNICO Y REPRESENTACIONES, S.A. DE C.V.

Av. Lincoln No. 3410 Pte. Col. Mitras Norte

Apdo. Postal 044-C Monterrey N.L. C.P. 64320, México

Conm. (81) 8158 0600

e-mail: ctrscientific@ctr.com.mx

www.ctr.com.mx

1.5 Número de teléfono en caso de emergencia

SETIQ: 01800 002 1400

b) SECCIÓN 2. Identificación de los peligros:

2.1 Clasificación de la sustancia química peligrosa conforme la GHS.

Información no disponible

2.2 Elementos de la señalización.

Información no disponible

Declaración de riesgo

H351 Se sospecha que provoca cáncer

H331 Tóxico en caso de inhalación.

H311 Tóxico en contacto con la piel.

H301 Tóxico en caso de ingestión.

H372 Perjudica a determinados órganos por exposición prolongada o repetida

H412 Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Fecha de Elaboración: Junio 2018

Fecha de Próxima Revisión: Junio 2020

Rev. 0

Pag. 1



HOJA DE SEGURIDAD

H420 Peligroso para la capa de ozono

Precauciones

Información no disponible

2.3 Otros peligros que no contribuyen en la clasificación.

No disponible

c) SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes:

3.1 Sustancias

Caracterización química (sustancia): Tetracloruro de carbono

Número CAS: 56-23-5

d) SECCIÓN 4. Primeros auxilios:

4.1 Descripción de los primeros auxilios

- **Inhalación:** Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica
- **Contacto con los ojos:** Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
- **Contacto con la piel :** Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica
- **Ingestión :** Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante y proporcionar asistencia médica

4.2 Síntomas y efectos más importantes, agudos y crónicos.

Información no disponible.

4.3 Indicación de la necesidad de recibir atención médica inmediata y, en su caso, tratamiento especial.

Información no disponible

e) SECCIÓN 5. Medidas contra incendios:

5.1 Medios de extinción apropiados

Niebla de agua, espuma, CO₂, químico seco. En general cualquier medio de extinción de incendios siempre y cuando no se aplique directamente.

5.2 Peligros específicos de las sustancias químicas peligrosas o mezclas.

Humos tóxicos e irritantes como cloruro de hidrógeno, cloro y fosgeno.

5.3 Medidas especiales que deberán seguir los grupos de combate contra incendio.

Ropa protectora de cobertura completa y equipo respiratorio autónomo.



HOJA DE SEGURIDAD

f) SECCIÓN 6. Medidas que deben tomarse en caso de derrame accidental o fuga accidental:

6.1 Precauciones personales, equipos de protección y procedimientos de emergencia

Traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Recoger, en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

Información no disponible

6.3 Métodos y materiales para la contención y limpieza de derrames o fugas

Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Recoger en la medida de lo posible, el líquido que se derrama y el ya derramado en recipientes herméticos, absorber el líquido residual y trasladarlo a un lugar seguro.

g) SECCIÓN 7. Manejo y almacenamiento:

7.1 Precauciones que se deben tomar para garantizar un manejo seguro

Separado de aluminio, bario, magnesio, potasio, sodio, flúor, alimentos y piensos. Ventilación a ras del suelo.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluida cualquier incompatibilidad.

EVITAR TODO CONTACTO. No comer, beber, ni fumar durante el trabajo. NO utilizar cerca del fuego, una superficie caliente o mientras se trabaja en soldadura.

h) SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección personal:

8.1 Parámetros de control

TLV-TWA (ppm) (mgr/m3): 5 ppm

TLV-STEL (ppm) (mgr/m3): 10 ppm

TLV-C (ppm): N.D

PIVS (ppm): N.D

8.2 Control de exposición

- **Protección de las vías respiratorias:** Ventilación, extracción localizada o utilizar protección
- **Protección de las manos y cuerpo:** Utilizar guantes protectores y traje de protección, pantalones gruesos pero cómodos y zapatos cerrados
- **Protección para la piel:** Si existe contacto con la piel deben utilizarse guantes y traje de seguridad completo. Debe haber ducha de seguridad cerca.
- **Protección para los ojos:** Se recomienda pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria - Ingestión: No comer, no beber y no fumar durante el trabajo.
- **-Medidas de higiene particulares :** Bañarse y lavar la ropa de trabajo después de la práctica, de ser posible con agua estéril caliente



HOJA DE SEGURIDAD

i) SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas:

9.1 Información sobre las propiedades físicas y químicas básicas

| | |
|--|--------------------|
| Apariencia (estado físico, color, etc.): | Líquido, incoloro, |
| Olor: | Dulce |
| Umbral del olor: | No disponible |
| Potencial de hidrógeno, pH: | No disponible |
| Punto de fusión/punto de congelación: | -23 °C |
| Punto inicial e intervalo de ebullición: | 76.5 °C |
| Punto de inflamación: | No disponible |
| Velocidad de evaporación: | No disponible |
| Inflamabilidad (sólido/gas): | No disponible |
| Límite superior/inferior de inflamabilidad o explosividad: | No disponible |
| UEL (Límite de explosión superior): | No disponible |
| Presión de vapor; a 20°C: | 100 mmHg |
| Densidad de vapor: | No disponible |
| Densidad relativa: | 1.59 |
| Solubilidad(es): | No disponible |
| Solubilidad en agua a 20 °C: | 0.1 g/ 100 ml |
| Coefficiente de partición n-octanol/agua: | No disponible |
| Temperatura de ignición espontánea: | No disponible |
| Temperatura de descomposición: | No disponible |
| Viscosidad; a 20°C: | No disponible |
| Peso molecular: | 153.8 |

j) SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad:

10.1 Reactividad

Reacciona violentamente con algunos metales tales como aluminio, bario, magnesio, potasio y sodio, con flúor y otras sustancias, originando peligro de incendio y explosión. Ataca al cobre, plomo y zinc.

10.2 Estabilidad química

Información no disponible.

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Información no disponible.

10.4 Condiciones que deberán evitarse

Metales tales como, aluminio, bario, magnesio, potasio, sodio, flúor, cobre, plomo y zinc. Fuentes de ignición y calor.

0.5 Materiales incompatibles

Metales tales como aluminio, bario, magnesio, potasio y sodio y flúor

1.6 Productos de descomposición peligrosos.

Gases tóxicos e irritantes como cloruro de hidrógeno, cloro y fosgeno

Fecha de Elaboración: Junio 2018

Fecha de Próxima Revisión: Junio 2020

Rev. 0

Pag. 4



HOJA DE SEGURIDAD

k) SECCIÓN 11. Información toxicológica:

11.1 Información sobre efectos toxicológicos.

LD-50: rata 2000 mg/ Kg

LD-50: conejo 1450 mg/ Kg.

Sustancia cancerígena sospechosa para el hombre

l) SECCIÓN 12. Información eco toxicológica:

12.1 Toxicidad

Información no disponible

12.2 Persistencia y degradabilidad

Información no disponible

12.3 Potencial de bioacumulación

Información no disponible

12.4 Movilidad en el suelo

Información no disponible

12.5 Otros efectos adversos.

Información no disponible

m) SECCIÓN 13. Información relativa a la eliminación de los productos:

Envases contaminados

Recomendación: Los envases contaminados se deben manejar del mismo modo que la sustancia en sí.

n) SECCIÓN 14. Información relativa al transporte:

14.1 Número ONU

1846

14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas

14.3 IMDG

Tetraclorometano

ONU: 1846

Clase 6

Etiqueta Tóxico

4.5 IATA

Tetraclorometano

NU: 1846

Clase 6

Fecha de Elaboración: Junio 2018

Fecha de Próxima Revisión: Junio 2020

Rev. 0

Pag. 5

Anexo 5. Ensayo de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

AGQ Labs

| | | | |
|--------------------|--|------------------|--------------------------|
| Nº de Referencia: | S-20/054717 | Registrada en: | AGQ Perú |
| Análisis: | S-PR-0011 | Centro Análisis: | AGQ International |
| Tipo Muestra: | SUELO AGRICOLA | Fecha/Hora: | 13/12/2020 |
| | | Muestreo: | 07/01/2021 |
| Lugar de Muestreo: | IGNACIO ESCUDERO | Fecha Recepción: | 28/12/2020 |
| Punto de Muestreo: | A1 | Fecha Fin: | 13/01/2021 |
| | | Contrato: | QMT-PE20120 Q211 |
| Muestreado por: | ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO | Cliente 3º(*): | --- |
| Descripción(*): | LA MUESTRA A1 CONTIENE 100% BENTONITA | Domicilio (*): | NO INDICA |
| Cliente (*): | ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO | | |

FERTILIDAD FÍSICA

| | |
|----------------|-----------|
| Clase Textural | Arcillosa |
| Arcilla | 60,2 % |
| Limo | 0,00 % |
| Arena | 39,8 % |
| Arena Fina | 0,00 % |
| Arena Gruesa | 39,8 % |

Riesgo de Compactación

Bajo Alto



FERTILIDAD

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|---------------------------|-----------|----------------|----------|-------|--------|-------|----------|--------------------|---------|
| Materia Orgánica | 0,24 | % | | 1,20 | | 2,00 | | Combustión | PE-2129 |
| Nitrógeno Total | 469 | mg/kg | | 1 000 | | 1 500 | | Olsen | PEC-034 |
| Fósforo Disponible Olsen | 21,2 | mg/kg | | 20,0 | | 40,0 | | Oxalato Amonico O. | PEC-014 |
| Caliza Activa | 1,53 | % CaCO3 | | 1,50 | | 4,00 | | | PE-2128 |
| Cond. Eléctrica (Ext 1/1) | 2 840 | µS/cm a 20° C | | | | | | | PE-2128 |
| pH (Extracto 1/1) | 8,12 | Unidades de pH | | | | | | | PE-2128 |

MICROELEMENTOS

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|------------------|-----------|----------|----------|------|--------|------|----------|---------------|---------|
| Boro | < 0,50 | mg/kg | | 0,60 | | 1,00 | | Extrac Acuosa | PE-2126 |
| Hierro (DTPA) | 16,6 | mg/kg | | 4,00 | | 10,0 | | DTPA | PEC-009 |
| Manganeso (DTPA) | 8,60 | mg/kg | | 1,00 | | 5,00 | | DTPA | PEC-009 |
| Cobre (DTPA) | 2,34 | mg/kg | | 0,40 | | 1,00 | | DTPA | PEC-009 |
| Zinc (DTPA) | 1,87 | mg/kg | | 1,00 | | 2,00 | | DTPA | PEC-009 |

COMPLEJO DE CAMBIO

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|--------------------|-----------|-----------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|---------|
| Calcio Cambio | 30,399 | meq/100 g | | 8,0000 | | 14,000 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Magnesio de Cambio | 5,81 | meq/100 g | | 1,50 | | 2,50 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Potasio Cambio | 1,14 | meq/100 g | | 0,50 | | 0,80 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Sodio Cambio | 33,4 | meq/100 g | | 0,25 | | 0,50 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Aluminio de Cambio | < 0,01 | meq/100 g | | 0,50 | | 1,00 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| CIC Efectiva | 70,8 | meq/100 g | | 5,00 | | 10,0 | | | PEC-019 |

RELACIONES DE INTERÉS

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|--------------|-----------|----------|----------|------|--------|------|----------|--------|---------|
| Relación C/N | 2,92 | | | 10,0 | | 15,0 | | | PEC-041 |

Nº de Referencia: **S-20/054717**Descripción(*): **LA MUESTRA A1 CONTIENE 100% BENTONITA**Tipo Muestra: **SUELO AGRICOLA**Fecha Fin: **13/01/2021**

RELACIONES CATIONICAS

% Cationes de Cambio

● Ca(77%/43%) ● Mg C(15%/8%) ● K C(5%/2%) ● Na C(3%/47%)

Ideal:



Real:

FECHA EMISIÓN: **15/01/2021**

NOTA

Nota: L.C.: Límite de Cuantificación. SP: sólo parental. Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Puede solicitar las incertidumbres, cuando estas no aparezcan en el informe. El cliente proporciona todos los datos asociados a la Toma de Muestras, cuando esta ha sido realizada por él. N/L: No Legislado.

OBSERVACIONES (*):

El parámetro clase textural se ha realizado mediante el método de Bouyoucos. El valor de arena total corresponde con el de arena gruesa.



Laura Argeme Caro Martin

Nº de Referencia: 5-21/008667 Tipo Muestra: SUELO AGRICOLA
 Descripción(*): MEZCLA PORCENTUAL DE BENTONITA Y YESO. / 95% DE BENTONITA+5% DE YESO. Fecha Fin: 02/03/2021

RESULTADOS ANALITICOS

| Parámetro | Resultado | Unidades | Incert |
|--|-----------|---------------------|--------|
| Propiedades Físicas - Granulometría | | | |
| * Arcilla | 65,0 | % | - |
| * Arena | 20,0 | % | - |
| * Clase Textural | Arcillosa | % | - |
| * Limo | 15,0 | % | - |
| Fertilidad | | | |
| pH (Extracto 1/1) | 7,59 | Unidades de pH | ±0,89 |
| Cond. Eléctrica (Ext 1/1) | 19 910 | µS/cm a 20° C | - |
| * Materia Orgánica Oxidable | 0,564 | % | - |
| * Nitrógeno Total | 457 | mg/kg | - |
| * Fósforo Disponible Olsen | 15,7 | mg/kg | - |
| * Caliza Activa | < 0,5 | % CaCO ₃ | - |
| Microelementos | | | |
| * Boro | < 0,50 | mg/kg | - |
| * Hierro (DTPA) | 7,60 | mg/kg | - |
| * Manganeseo (DTPA) | 3,62 | mg/kg | - |
| * Cobre (DTPA) | 0,9 | mg/kg | - |
| * Zinc (DTPA) | 0,41 | mg/kg | - |
| Complejo de Cambio | | | |
| * Calcio Cambio | > 49,9 | meq/100 g | - |
| * Magnesio de Cambio | 6,44 | meq/100 g | - |
| * Potasio Cambio | 1,31 | meq/100 g | - |
| * Sodio Cambio | 42,6 | meq/100 g | - |
| * Aluminio de Cambio | < 0,01 | meq/100 g | - |
| * CIC Efectiva | > 60 | meq/100 g | - |
| Relaciones de Interés | | | |
| * Relación C/N | 7,15 | | - |

Nota: Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Las incertidumbres de los parámetros acreditados están calculadas y a disposición del cliente. AGQ no se hace responsable de la Información proporcionada por el cliente, asociada a la toma de muestras y a otros datos descriptivos, marcados con (*). A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. La Incertidumbre aplicada al resultado no aplica para valores menores al Límite de Cuantificación (LC).

(13) Ensayo cubierto por la Acreditación nº TL-502 emitida por IAS.
 (8) Ensayo No cubierto por la Acreditación nº TL-502 emitida por IAS.

Nº de Referencia: S-21/008667

Descripción(*): MEZCLA PORCENTUAL DE BENTONITA Y YESO. / 95% DE BENTONITA+5% DE YESO.

Tipo Muestra: SUELO AGRICOLA

Fecha Fin: 02/03/2021

Los resultados de ensayo no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como un certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. La Incert Exp (U) ha sido reportada con un Factor de Cobertura $k=2$, para un nivel de confianza aprox del 95%

Observaciones (*):

Los parametros de pH y CE se realizaron en proporcion de 1/2 (w/v).

(*) El Lim Cuantif es el valor a partir de cual cuantificamos. El Lim Detecc es el valor a partir del cual detectamos (aplica a ensayos cualitativos). Para los parametros de Radiactividad es el AMD

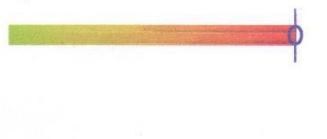
| | | | |
|--------------------|---|----------------------|--------------------------|
| Nº de Referencia: | S-20/054721 | Registrada en: | AGQ Perú |
| Análisis: | S-PR-0011 | Centro Análisis: | AGQ International |
| Tipo Muestra: | SUELO AGRICOLA | Fecha/Hora Muestreo: | 13/12/2020 |
| | | Fecha Recepción: | 28/12/2020 |
| Lugar de Muestreo: | IGNACIO ESCUDERO/MÓRROPE | Fecha Fin: | 15/01/2021 |
| Punto de Muestreo: | A5 | Contrato: | QMT-PE20120 0211 |
| Muestreado por: | ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO | Cliente 3º(*): | --- |
| Descripción(*): | LA MUESTRA A5 CONTIENE 90% DE BENTONITA Y 10% DE YESO. | Domicilio (*): | NO INDICA |
| Cliente (*): | ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO | | |

FERTILIDAD FÍSICA

| | |
|----------------|-----------------|
| Clase Textural | Arcillo-Arenosa |
| Arcilla | 42,0 % |
| Limo | 5,25 % |
| Arena | 52,8 % |
| Arena Fina | 0,00 % |
| Arena Gruesa | 52,8 % |

Riesgo de Compactación

Bajo Alto



FERTILIDAD

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|---------------------------|--------------|----------------|----------|-------|--------|-------|----------|--------------------|---------|
| Materia Orgánica | 0,24 | % | | 1,20 | | 2,00 | | Combustión | PE-2129 |
| Nitrógeno Total | 398 | mg/kg | | 1 000 | | 1 500 | | | PEC-034 |
| Fósforo Disponible Olsen | 20,4 | mg/kg | | 20,0 | | 40,0 | | Olsen | PE-2125 |
| Caliza Activa | 4,96 | % CaCO3 | | 1,50 | | 4,00 | | Oxalato Amonico 0. | PEC-014 |
| Cond. Eléctrica (Ext 1/1) | 5 010 | µS/cm a 20° C | | | | | | | PE-2128 |
| pH (Extracto 1/1) | 7,94 | Unidades de pH | | | | | | | PE-2128 |

MICROELEMENTOS

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|------------------|------------------|----------|----------|------|--------|------|----------|---------------|---------|
| Boro | < 0,50 | mg/kg | | 0,60 | | 1,00 | | Extrac Acuosa | PE-2126 |
| Hierro (DTPA) | 12,1 | mg/kg | | 4,00 | | 10,0 | | DTPA | PEC-009 |
| Manganeso (DTPA) | 6,01 | mg/kg | | 1,00 | | 5,00 | | DTPA | PEC-009 |
| Cobre (DTPA) | 1,98 | mg/kg | | 0,40 | | 1,00 | | DTPA | PEC-009 |
| Zinc (DTPA) | 1,57 | mg/kg | | 1,00 | | 2,00 | | DTPA | PEC-009 |

COMPLEJO DE CAMBIO

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|--------------------|------------------|-----------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|---------|
| Calcio Cambio | 8,5419 | meq/100 g | | 8,0000 | | 14,000 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Magnesio de Cambio | 0,53 | meq/100 g | | 1,50 | | 2,50 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Potasio Cambio | 0,12 | meq/100 g | | 0,50 | | 0,80 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Sodio Cambio | 1,80 | meq/100 g | | 0,25 | | 0,50 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| Aluminio de Cambio | < 0,01 | meq/100 g | | 0,50 | | 1,00 | | Ac NH4 | PEC-009 |
| CIC Efectiva | 11,0 | meq/100 g | | 5,00 | | 10,0 | | | PEC-019 |

RELACIONES DE INTERÉS

| Parámetro | Resultado | Unidades | Muy Bajo | Bajo | Normal | Alto | Muy Alto | Método | PNT |
|--------------|-------------|----------|----------|------|--------|------|----------|--------|---------|
| Relación C/N | 3,47 | | | 10,0 | | 15,0 | | | PEC-041 |

Nº de Referencia: S-20/054721

Descripción(*): LA MUESTRA A5 CONTIENE 90% DE BENTONITA Y 10% DE YESO.

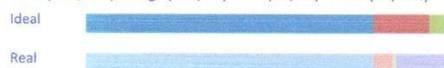
Tipo Muestra: SUELO AGRICOLA

Fecha Fin: 15/01/2021

RELACIONES CATIONICAS

% Cationes de Cambio

● Ca(77%/78%) ● Mg C(15%/5%) ● K C(5%/1%) ● Na C(3%/16%)



FECHA EMISIÓN: 15/01/2021

NOTA

Nota: L.C.: Limite de Cuantificación. SP: sólo parental. Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. Puede solicitar las incertidumbres, cuando estas no aparezcan en el informe. El cliente proporciona todos los datos asociados a la Toma de Muestras, cuando esta ha sido realizada por él. N/L: No Legislado.

OBSERVACIONES (*):

El parámetro clase textural se ha realizado mediante el método de Bouyoucos. El valor de arena total corresponde con el de arena gruesa.



Laura Argeme Caro Martin

Anexo 6. Límites de Consistencia

LÍMITE DE CONSISTENCIA

| | |
|----------------------|---|
| NOMBRE DEL PROYECTO: | EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS. |
| UBICACIÓN: | CHICLAYO-PERÚ. |
| FECHA: | 16/01/2021 |
| N° DE MUESTRA: | 1 |

PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA (m):

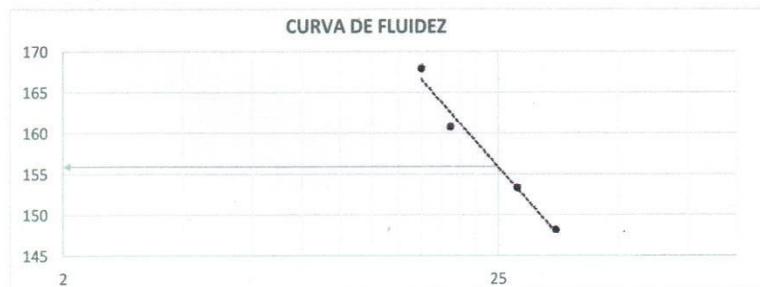
DESCRIPCIÓN DEL SUELO: 100% BENTONITA + 0% YESO.

LÍMITE LÍQUIDO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--|--|--|
| N° DE LATA | 20 | 5 | 14 | 6 | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 46.720 | 47.480 | 47.210 | 45.700 | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 40.720 | 40.780 | 40.490 | 39.890 | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 36.670 | 36.410 | 36.310 | 36.430 | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 4.050 | 4.370 | 4.180 | 3.460 | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 6.000 | 6.700 | 6.720 | 5.810 | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 148.148 | 153.318 | 160.766 | 167.919 | | | |
| N° DE GOLPES: | 35 | 28 | 19 | 16 | | | |

LÍMITE PLÁSTICO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--|--|--|--------|--|
| N° DE LATA | 18 | 9 | | | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 38.630 | 40.000 | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 37.840 | 39.170 | | | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 35.540 | 36.740 | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 2.300 | 2.430 | | | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 0.790 | 0.830 | | | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 34.348 | 34.156 | | | | | |
| LÍMITE PLÁSTICO (%): | | | | | | 34.252 | |



LÍMITE LÍQUIDO (%): 155.915
 LÍMITE PLÁSTICO (%): 34.252
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 121.663
 ÍNDICE DE FLUENCIA: -55.164

[Firma manuscrita]

LÍMITE DE CONSISTENCIA

| | |
|----------------------|---|
| NOMBRE DEL PROYECTO: | EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS. |
| UBICACIÓN: | CHICLAYO-PERÚ. |
| FECHA: | 16/01/2021 |
| N° DE MUESTRA: | 3 |

PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA (m):

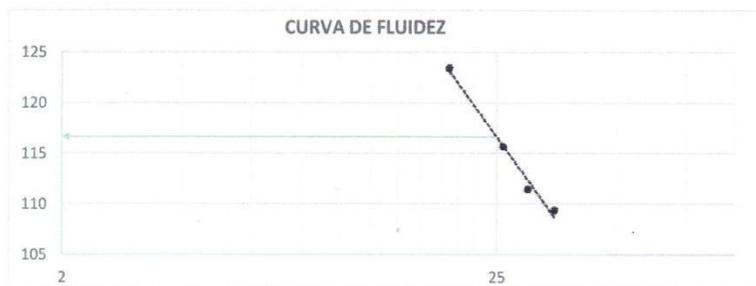
DESCRIPCIÓN DEL SUELO: 95% BENTONITA + 5% YESO.

LÍMITE LÍQUIDO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--|--|--|
| N° DE LATA | UVL-10 | UVL-03 | CP-03 | J-01 | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 45.510 | 45.930 | 37.070 | 43.740 | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 36.290 | 36.590 | 27.370 | 34.720 | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 27.860 | 28.210 | 18.980 | 27.410 | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 8.430 | 8.380 | 8.390 | 7.310 | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 9.220 | 9.340 | 9.700 | 9.020 | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 109.371 | 111.456 | 115.614 | 123.393 | | | |
| N° DE GOLPES: | 35 | 30 | 26 | 19 | | | |

LÍMITE PLÁSTICO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|--|--|--|--|--|--------|
| N° DE LATA | OVL-06 | | | | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 42.070 | | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 41.000 | | | | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 37.070 | | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 3.930 | | | | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 1.070 | | | | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 27.226 | | | | | | |
| LÍMITE PLÁSTICO (%): | | | | | | | 27.226 |



LÍMITE LÍQUIDO (%): 116.636
 LÍMITE PLÁSTICO (%): 27.226
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 89.409
 ÍNDICE DE FLUENCIA: -54.475

[Handwritten Signature]

LÍMITE DE CONSISTENCIA

| | |
|----------------------|---|
| NOMBRE DEL PROYECTO: | EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS. |
| UBICACIÓN: | CHICLAYO-PERÚ. |
| FECHA: | 16/01/2021 |
| N° DE MUESTRA: | 4 |

PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA (m):

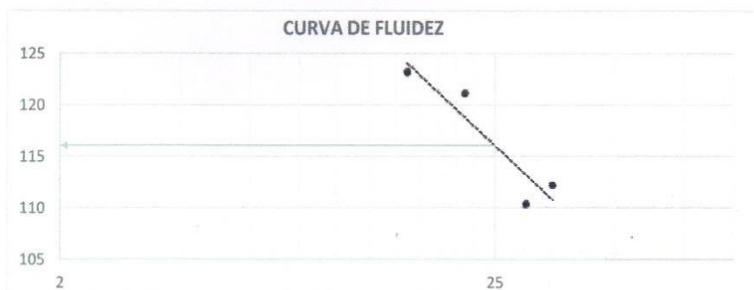
DESCRIPCIÓN DEL SUELO: 92.5% BENTONITA + 7.5% YESO.

LÍMITE LÍQUIDO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|--|--|--|
| N° DE LATA | Z-14 | UVL-08 | CL-15 | A-2 | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 33.660 | 42.350 | 34.950 | 37.670 | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 24.920 | 33.150 | 26.000 | 29.010 | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 17.000 | 24.950 | 18.610 | 21.980 | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 7.920 | 8.200 | 7.390 | 7.030 | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 8.740 | 9.200 | 8.950 | 8.660 | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 110.354 | 112.195 | 121.110 | 123.186 | | | |
| N° DE GOLPES: | 30 | 35 | 21 | 15 | | | |

LÍMITE PLÁSTICO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--|--|--|--|--------|
| N° DE LATA | JA-11 | JA-09 | | | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 30.960 | 29.970 | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 30.210 | 29.020 | | | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 27.510 | 25.580 | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 2.700 | 3.440 | | | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 0.750 | 0.950 | | | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 27.778 | 27.616 | | | | | |
| LÍMITE PLÁSTICO (%): | | | | | | | 27.697 |



LÍMITE LÍQUIDO (%): 116.059
LÍMITE PLÁSTICO (%): 27.697
ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 88.362
ÍNDICE DE FLUENCIA: -36.089

Wilson Olaya Aguilar

LÍMITE DE CONSISTENCIA

| | |
|----------------------|---|
| NOMBRE DEL PROYECTO: | EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS. |
| UBICACIÓN: | CHICLAYO-PERÚ. |
| FECHA: | 16/01/2021 |
| N° DE MUESTRA: | 5 |

PROFUNDIDAD DE LA MUESTRA (m):

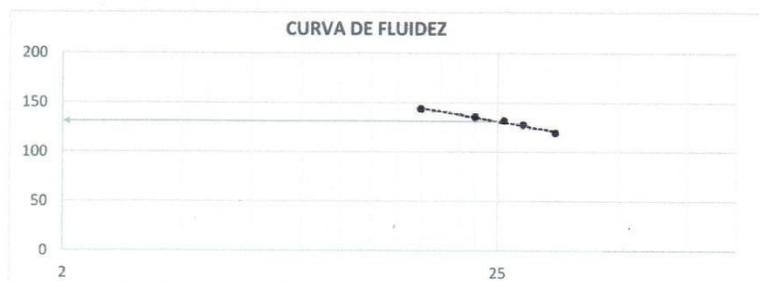
DESCRIPCIÓN DEL SUELO: 90% BENTONITA + 10% YESO.

LÍMITE LÍQUIDO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--|--|
| N° DE LATA | 6 | 10 | 18 | 5 | 1 | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 24.420 | 27.190 | 30.190 | 26.480 | 27.370 | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 18.390 | 19.150 | 21.470 | 18.420 | 18.790 | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 13.330 | 12.850 | 14.850 | 12.470 | 12.810 | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 5.060 | 6.300 | 6.620 | 5.950 | 5.980 | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 6.030 | 8.040 | 8.720 | 8.060 | 8.580 | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 119.170 | 127.619 | 131.722 | 135.462 | 143.478 | | |
| N° DE GOLPES: | 35 | 29 | 26 | 22 | 16 | | |

LÍMITE PLÁSTICO

| | | | | | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--|--|--|--|--------|
| N° DE LATA | 14 | 15 | | | | | |
| PESO DE SUELO HÚMEDO + LATA (gr.): | 16.220 | 16.560 | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO + LATA (gr.): | 15.360 | 15.550 | | | | | |
| PESO DE LATA (gr.): | 12.720 | 12.570 | | | | | |
| PESO DE SUELO SECO (gr.): | 2.640 | 2.980 | | | | | |
| PESO DE AGUA (gr.): | 0.860 | 1.010 | | | | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%): | 32.576 | 33.893 | | | | | |
| LÍMITE PLÁSTICO (%): | | | | | | | 33.234 |



LÍMITE LÍQUIDO (%): 131.190
 LÍMITE PLÁSTICO (%): 33.234
 ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 97.956
 ÍNDICE DE FLUENCIA: -69.175

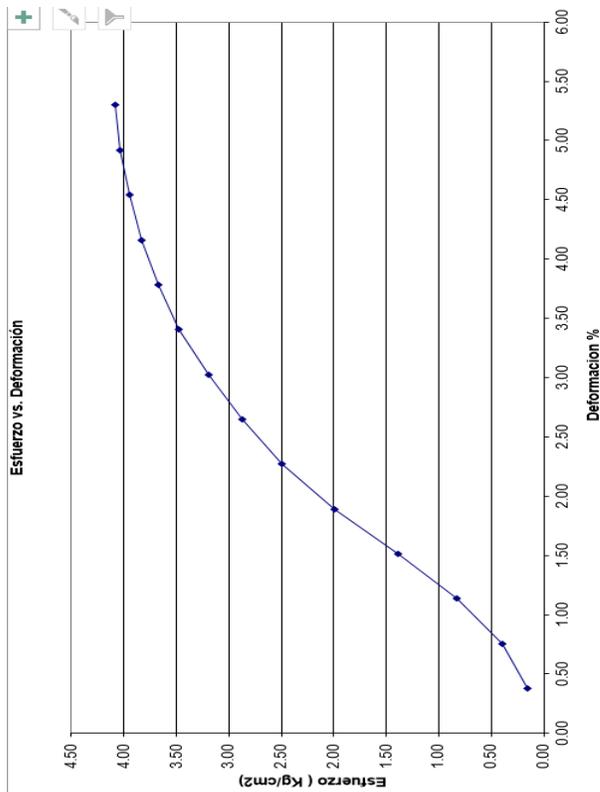
R. Olaya

Anexo 7. Resistencia a la Compresión Simple (RCS)

| | |
|--|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TEMA: EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | DATOS |
| FECHA: 27/01/2021 | RESULTADOS |
| COMPOSICIÓN: 100% BENTONITA+40% YESO | |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | Nº LABORATORIO 1 |

| | | | | | |
|--------------|--------|--------------------|-------------|-------|-----------------------|
| Dímetro | 4.034 | cm. | yd max | 1.480 | gr/cm ³ |
| Alt. Inicial | 7.929 | cm. | Gs. | 2071 | |
| Area | 12.76 | cm ² . | W% | 13 | % |
| Volumen | 101.34 | cm ³ . | Ang. Rótura | 57 | º |
| P. Humedo | 169.53 | gr. | Qmax | 4.11 | (Kg/cm ²) |
| P. Unitario | 1.67 | gr/cm ³ | Cohesión | | |
| Alt. Final | 7.45 | cm. | | | |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm ²) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm ²) | ε % |
|-----------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|------|
| 0.3 | 0.00378 | 0.99622 | 12.83 | | 2.050 | 0.16 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00757 | 0.99243 | 12.88 | | 5.100 | 0.40 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01135 | 0.98865 | 12.93 | | 10.700 | 0.83 | 1.14 |
| 1.2 | 0.01513 | 0.98487 | 12.98 | | 18.000 | 1.39 | 1.51 |
| 1.5 | 0.01892 | 0.98108 | 13.03 | | 25.900 | 1.99 | 1.89 |
| 1.8 | 0.02270 | 0.97730 | 13.08 | | 32.600 | 2.49 | 2.27 |
| 2.1 | 0.02649 | 0.97351 | 13.13 | | 37.700 | 2.87 | 2.65 |
| 2.4 | 0.03027 | 0.96973 | 13.18 | | 42.050 | 3.19 | 3.03 |
| 2.7 | 0.03405 | 0.96595 | 13.23 | | 46.000 | 3.48 | 3.41 |
| 3.0 | 0.03784 | 0.96216 | 13.28 | | 48.800 | 3.67 | 3.78 |
| 3.3 | 0.04162 | 0.95838 | 13.34 | | 51.100 | 3.83 | 4.16 |
| 3.6 | 0.04540 | 0.95460 | 13.39 | | 52.900 | 3.95 | 4.54 |
| 3.9 | 0.04919 | 0.95081 | 13.44 | | 54.250 | 4.04 | 4.92 |
| 4.2 | 0.05297 | 0.94703 | 13.50 | | 55.100 | 4.08 | 5.30 |
| 4.5 | 0.05675 | 0.94325 | 13.55 | | 55.700 | 4.11 | 5.68 |
| 4.8 | 0.06056 | 0.93934 | 13.61 | | 55.900 | 4.11 | 6.07 |
| 5.1 | 0.06432 | 0.93568 | 13.66 | | 55.450 | 4.06 | 6.43 |

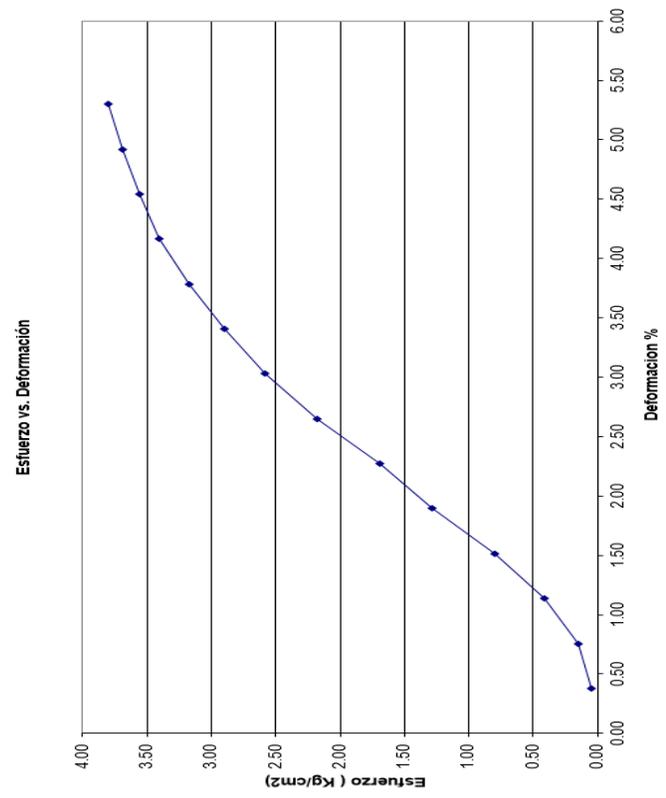


Handwritten signature

| | |
|--|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAJO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| ARCILLOSOS EXPANSIVOS | |
| COMPOSICIÓN: 100% BENTONITA+0% YESO | FECHA: 27/01/2021 |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | N° LABORATORIO: 2 |
| DATOS | |
| RESULTADOS | |

| | | | | | |
|--------------|--------|--------------------|-------------|-------|-----------------------|
| Díametro | 4.027 | cm. | yd max | 1.486 | gr/cm3 |
| Alt. Inicial | 7.925 | cm. | Gs. | 2071 | |
| Area | 12.74 | cm ² , | W% | 13 | % |
| Volumen | 100.94 | cm ³ , | Ang. Rotura | 57 | ° |
| P. Humedo | 169.51 | gr. | Qumax | 3.92 | (Kg/cm ²) |
| P. Unitario | 1.68 | gr/cm ³ | Cohesión | | |
| Alt. Final | 7.42 | cm. | | | |

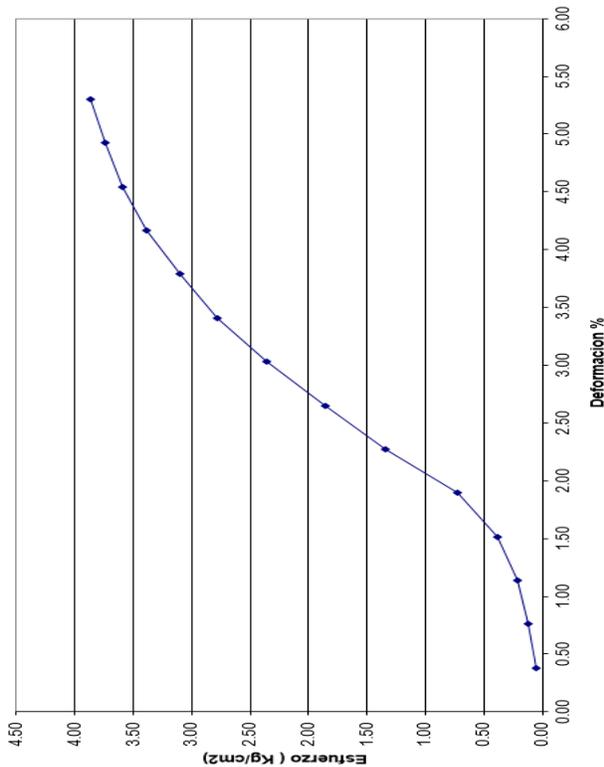
| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm ²) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm ²) | ε % |
|-----------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|------|
| 0.3 | 0.00379 | 0.99621 | 12.78 | | 0.550 | 0.04 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00757 | 0.99243 | 12.83 | | 1.950 | 0.15 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01136 | 0.98864 | 12.88 | | 5.250 | 0.41 | 1.14 |
| 1.2 | 0.01514 | 0.98486 | 12.93 | | 10.300 | 0.80 | 1.51 |
| 1.5 | 0.01893 | 0.98107 | 12.98 | | 16.700 | 1.29 | 1.89 |
| 1.8 | 0.02271 | 0.97729 | 13.03 | | 22.000 | 1.69 | 2.27 |
| 2.1 | 0.02650 | 0.97350 | 13.08 | | 28.550 | 2.18 | 2.65 |
| 2.4 | 0.03028 | 0.96972 | 13.13 | | 33.950 | 2.58 | 3.03 |
| 2.7 | 0.03407 | 0.96593 | 13.19 | | 38.250 | 2.90 | 3.41 |
| 3.0 | 0.03785 | 0.96215 | 13.24 | | 42.000 | 3.17 | 3.78 |
| 3.3 | 0.04164 | 0.95836 | 13.29 | | 45.200 | 3.40 | 4.16 |
| 3.6 | 0.04543 | 0.95457 | 13.34 | | 47.500 | 3.56 | 4.54 |
| 3.9 | 0.04921 | 0.95079 | 13.40 | | 49.500 | 3.70 | 4.92 |
| 4.2 | 0.05300 | 0.94700 | 13.45 | | 51.150 | 3.80 | 5.30 |
| 4.5 | 0.05678 | 0.94322 | 13.50 | | 52.250 | 3.87 | 5.68 |
| 4.8 | 0.06057 | 0.93943 | 13.56 | | 53.000 | 3.91 | 6.06 |
| 5.1 | 0.06435 | 0.93565 | 13.61 | | 53.400 | 3.92 | 6.44 |
| 5.4 | 0.06814 | 0.93186 | 13.67 | | 53.250 | 3.90 | 6.81 |



Robert



Esfuerzo vs. Deformación



| | |
|--|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| ARCILLOSOS EXPANSIVOS | |
| COMPOSICIÓN: 100% BENTONITAZO, YESO | FECHA: 27/01/2021 |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | Nº LABORATORIO: 3 |
| DATOS | |
| RESULTADOS | |

| | | | | | |
|--------------|--------|--------|-------------|-------|----------|
| Diámetro | 4.035 | cm. | yd max | 1.482 | gr/cm3 |
| Alt. Inicial | 7.92 | cm. | Gs. | 2071 | |
| Area | 12.79 | cm2 | W% | 13 | % |
| Volumen | 101.27 | cm3 | Ang. Rotura | 57 | ° |
| P. Humedo | 169.55 | gr. | Qumax | 4.04 | (Kg/cm2) |
| P. Umidario | 1.67 | gr/cm3 | Cohesión | | |
| Alt. Final | 7.38 | cm. | | | |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|--------|--------|------------|------|
| 0.3 | 0.00379 | 0.99621 | 12.84 | | 0.650 | 0.05 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00758 | 0.99242 | 12.88 | | 1.300 | 0.12 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01136 | 0.98864 | 12.93 | | 2.800 | 0.22 | 1.14 |
| 1.2 | 0.01515 | 0.98485 | 12.98 | | 5.000 | 0.39 | 1.52 |
| 1.5 | 0.01894 | 0.98106 | 13.03 | | 9.500 | 0.73 | 1.89 |
| 1.8 | 0.02273 | 0.97727 | 13.08 | | 17.600 | 1.35 | 2.27 |
| 2.1 | 0.02652 | 0.97348 | 13.14 | | 24.400 | 1.86 | 2.65 |
| 2.4 | 0.03030 | 0.96970 | 13.19 | | 31.100 | 2.36 | 3.03 |
| 2.7 | 0.03409 | 0.96591 | 13.24 | | 38.750 | 2.78 | 3.41 |
| 3.0 | 0.03788 | 0.96212 | 13.29 | | 41.150 | 3.10 | 3.79 |
| 3.3 | 0.04167 | 0.95833 | 13.34 | | 45.200 | 3.39 | 4.17 |
| 3.6 | 0.04545 | 0.95455 | 13.40 | | 48.100 | 3.59 | 4.55 |
| 3.9 | 0.04924 | 0.95076 | 13.45 | | 50.350 | 3.74 | 4.92 |
| 4.2 | 0.05303 | 0.94697 | 13.50 | | 52.250 | 3.87 | 5.30 |
| 4.5 | 0.05682 | 0.94318 | 13.56 | | 53.700 | 3.96 | 5.68 |
| 4.8 | 0.06061 | 0.93939 | 13.61 | | 54.650 | 4.01 | 6.06 |
| 5.1 | 0.06439 | 0.93561 | 13.67 | | 55.250 | 4.04 | 6.44 |
| 5.4 | 0.06818 | 0.93182 | 13.72 | | 55.500 | 4.04 | 6.82 |
| 5.7 | 0.07197 | 0.92803 | 13.78 | | 55.150 | 4.00 | 7.20 |

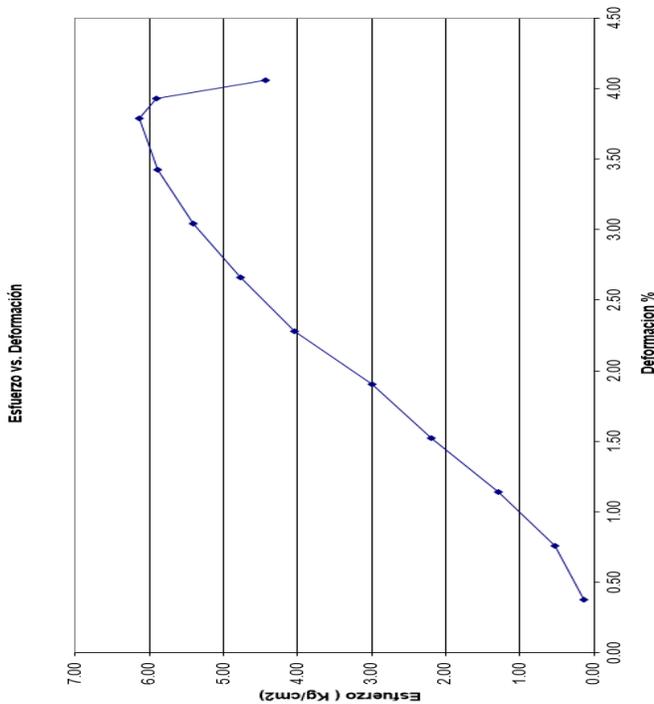
Handwritten signature



| | | |
|--|---|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS | |
| | FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. | |
| ENSAJO DE COMPRESIÓN SIMPLE | | |
| ARCILLOSOS EXPANSIVOS | | |
| COMPOSICIÓN: 97.5% BENTONITA+2.5% YESO | FECHA: 27/01/2021 | |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEYADO | Nº LABORATORIO | 1 |
| | RESULTADOS | |

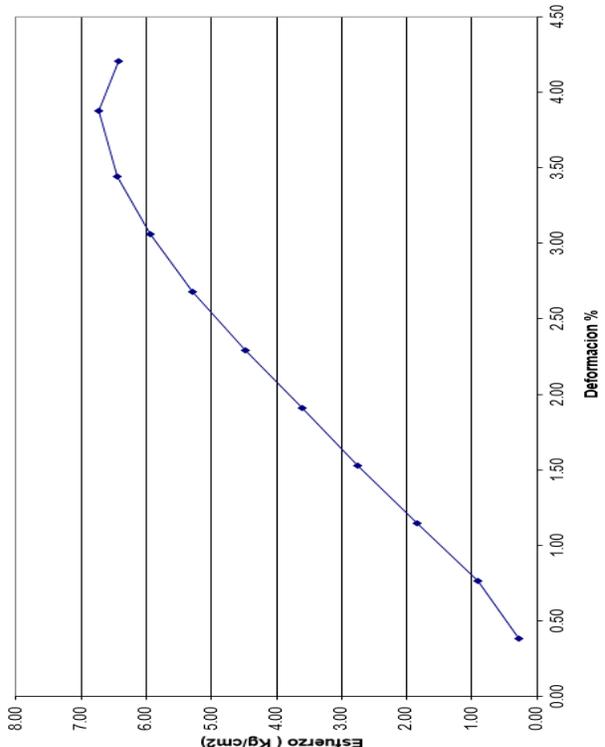
| | | | | | |
|--------------|--------|--------|-------------|-------|----------|
| Díametro | 4.063 | cm. | yd max | 1.337 | gr/cm3 |
| Alt. Inicial | 7.888 | cm. | Gs: | | |
| Area | 12.97 | cm2 | W% | 20.94 | % |
| Volumen | 102.27 | cm3 | Ang. Rotura | | º |
| P. Humedo | 165.35 | gr. | qumax | 6.14 | (Kg/cm2) |
| P. Unilario | 1.62 | gr/cm3 | Cohesión | | |
| Alt. Final | 7.59 | cm. | | | |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (N/w) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|---------|--------|------------|------|
| 0.3 | 0.00380 | 0.99620 | 13.01 | 20 | 1.800 | 0.14 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00761 | 0.99239 | 13.06 | 40 | 6.850 | 0.52 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01141 | 0.98859 | 13.11 | 60 | 16.850 | 1.28 | 1.14 |
| 1.2 | 0.01521 | 0.98479 | 13.17 | 80 | 28.950 | 2.20 | 1.52 |
| 1.5 | 0.01902 | 0.98098 | 13.22 | 100 | 39.600 | 3.00 | 1.90 |
| 1.8 | 0.02282 | 0.97718 | 13.27 | 120 | 53.600 | 4.04 | 2.28 |
| 2.1 | 0.02662 | 0.97338 | 13.32 | 140 | 63.650 | 4.78 | 2.66 |
| 2.4 | 0.03043 | 0.96957 | 13.37 | 160 | 72.250 | 5.40 | 3.04 |
| 2.7 | 0.03423 | 0.96577 | 13.42 | 180 | 79.100 | 5.89 | 3.42 |
| 2.99 | 0.03791 | 0.96209 | 13.48 | 200 | 82.700 | 6.14 | 3.79 |
| 3.1 | 0.03930 | 0.96070 | 13.50 | 230 | 79.700 | 5.91 | 3.93 |
| 3.2 | 0.04057 | 0.95943 | 13.51 | 230 | 59.800 | 4.43 | 4.06 |



Handwritten signature in blue ink.

Esfuerzo vs. Deformación



| | |
|--|---|
| UNIDAD DE POSTGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| ARCILLOSOS EXPANSIVOS | |
| COMPOSICIÓN: 87.5% BENTONITA+7.5% YESO | FECHA: 27/01/2021 |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | Nº LABORATORIO 2 |
| DATOS | |
| RESULTADOS | |

| | | |
|--------------|--------|--------------------|
| Diámetro | 4.047 | cm. |
| Alt. Inicial | 7.849 | cm. |
| Area | 12.86 | cm ² . |
| Volumen | 100.96 | cm ³ . |
| P. Humedo | 163.94 | gr. |
| P. Unitario | 1.62 | gr/cm ³ |
| Alt. Final | 7.55 | cm. |

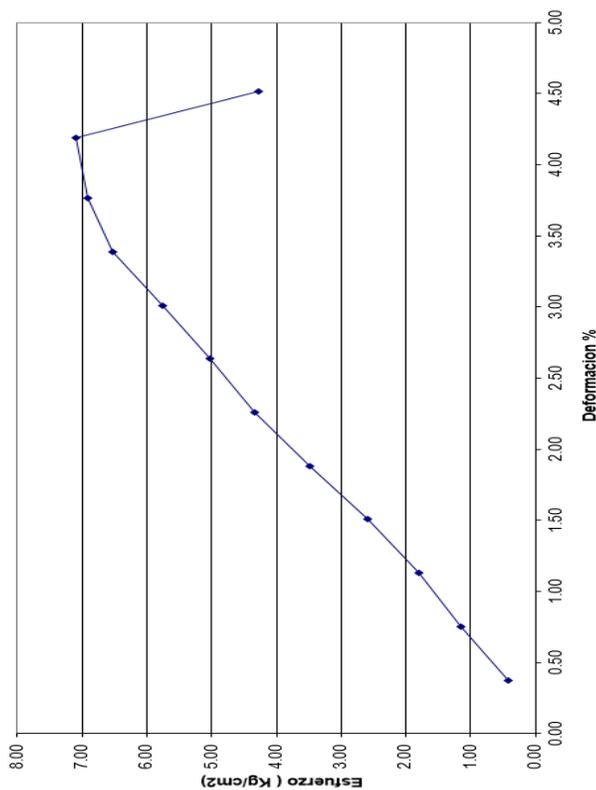
| | | |
|-------------------|-------|-----------------------|
| vd max | 1.352 | gr/cm ³ |
| Gs: | | |
| W% | 20.14 | % |
| Ang. Rolura | | ° |
| q _{umax} | 6.73 | (Kg/cm ²) |
| Cohesión | | |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm ²) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm ²) | ε % |
|-----------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|------|
| 0.3 | 0.00382 | 0.99618 | 12.91 | 20 | 3.580 | 0.28 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00764 | 0.99236 | 12.96 | 40 | 11.800 | 0.91 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01147 | 0.98853 | 13.01 | 60 | 24.000 | 1.84 | 1.15 |
| 1.2 | 0.01529 | 0.98471 | 13.06 | 80 | 36.050 | 2.76 | 1.53 |
| 1.5 | 0.01911 | 0.98089 | 13.11 | 100 | 47.200 | 3.60 | 1.91 |
| 1.8 | 0.02293 | 0.97707 | 13.17 | 120 | 58.900 | 4.47 | 2.29 |
| 2.1 | 0.02676 | 0.97324 | 13.22 | 140 | 69.950 | 5.29 | 2.68 |
| 2.4 | 0.03058 | 0.96942 | 13.27 | 160 | 78.900 | 5.95 | 3.06 |
| 2.7 | 0.03440 | 0.96560 | 13.32 | 180 | 85.850 | 6.44 | 3.44 |
| 3.04 | 0.03873 | 0.96127 | 13.38 | 220 | 90.000 | 6.73 | 3.87 |
| 3.3 | 0.04204 | 0.95796 | 13.43 | 230 | 86.300 | 6.43 | 4.20 |



Handwritten signature

Esfuerzo vs. Deformación



| | | | |
|------------------------------------|---|----------------|------------|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS | DATOS | |
| | FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. | RESULTADOS | |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | | | |
| ARCILLOSOS EXPANSIVOS | | | |
| COMPOSICIÓN: | 97.5% BENTONITA+2.5% YESO | FECHA: | 27/01/2021 |
| TESISTA: | ROBERTO MARTIN ZAMORA NEVADO. | Nº LABORATORIO | 3 |

| | | | | | |
|--------------|--------|--------|-------------|-------|----------|
| Diámetro | 4.057 | cm. | yd max | 1.368 | gr/cm3 |
| Alt. Inicial | 7.97 | cm. | Gs. | | |
| Area | 12.93 | cm2. | W% | 21 | % |
| Volumen | 103.03 | cm3. | Ang. Rotura | | o |
| P. Humedo | 170.51 | gr. | Quimax | 7.10 | (Kg/cm2) |
| P. Unitario | 1.65 | gr/cm3 | Cohesión | | |
| Alt. Final | 7.64 | cm. | | | |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|--------|--------|------------|------|
| 0.3 | 0.00376 | 0.99624 | 12.98 | 20 | 5.500 | 0.42 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00753 | 0.99247 | 13.03 | 40 | 15.050 | 1.16 | 0.75 |
| 0.9 | 0.01129 | 0.98871 | 13.07 | 60 | 23.500 | 1.80 | 1.13 |
| 1.2 | 0.01506 | 0.98494 | 13.12 | 80 | 33.900 | 2.58 | 1.51 |
| 1.5 | 0.01882 | 0.98118 | 13.18 | 100 | 45.850 | 3.48 | 1.88 |
| 1.8 | 0.02258 | 0.97742 | 13.23 | 120 | 57.250 | 4.33 | 2.26 |
| 2.1 | 0.02635 | 0.97365 | 13.28 | 140 | 66.750 | 5.03 | 2.63 |
| 2.4 | 0.03011 | 0.96989 | 13.33 | 160 | 76.850 | 5.77 | 3.01 |
| 2.7 | 0.03388 | 0.96612 | 13.38 | 180 | 87.350 | 6.53 | 3.39 |
| 3 | 0.03764 | 0.96236 | 13.43 | 200 | 93.000 | 6.92 | 3.76 |
| 3.34 | 0.04191 | 0.95809 | 13.49 | 230 | 95.850 | 7.10 | 4.19 |
| 3.6 | 0.04517 | 0.95483 | 13.54 | 230 | 58.000 | 4.28 | 4.52 |



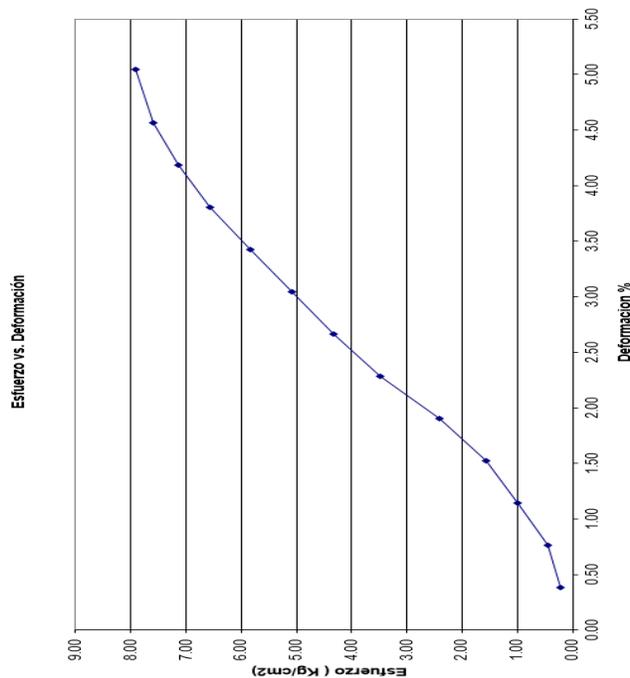
Handwritten signature

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAJO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TESIS: EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | |
| FECHA: 27/01/2021 | Nº LABORATORIO 1 |
| COMPOSICIÓN: 95% BENTONITA+5% YESO | |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | |
| DATOS | RESULTADOS |

| | | |
|-------------|-------|----------|
| yd max | 1.395 | gr/cm3 |
| Gs: | | |
| W% | 21.16 | % |
| Ang. Rotura | 57 | º |
| qumax | 7.92 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

| | | |
|--------------|--------|--------|
| Díametro | 4.037 | cm. |
| Alt. Inicial | 7.891 | cm. |
| Area | 12.80 | cm2. |
| Volumen | 101.00 | cm3. |
| P. Humedo | 170.73 | gr. |
| P. Unitario | 1.69 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.49 | cm. |

| Δh (m.m.) | ϵ | 1- ϵ | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ϵ % |
|-------------------|------------|---------------|----------|--------|---------|-------------------|--------------|
| 0.3 | 0.00380 | 0.99620 | 12.85 | 20 | 2.850 | 0.22 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00760 | 0.99240 | 12.90 | 40 | 5.850 | 0.45 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01141 | 0.98859 | 12.95 | 60 | 12.750 | 0.98 | 1.14 |
| 1.2 | 0.01521 | 0.98479 | 13.00 | 80 | 20.400 | 1.57 | 1.52 |
| 1.5 | 0.01901 | 0.98099 | 13.05 | 100 | 31.500 | 2.41 | 1.90 |
| 1.8 | 0.02281 | 0.97719 | 13.10 | 120 | 45.550 | 3.48 | 2.28 |
| 2.1 | 0.02661 | 0.97339 | 13.15 | 140 | 56.950 | 4.33 | 2.66 |
| 2.4 | 0.03041 | 0.96959 | 13.20 | 160 | 67.100 | 5.08 | 3.04 |
| 2.7 | 0.03422 | 0.96578 | 13.25 | 180 | 77.250 | 5.83 | 3.42 |
| 3 | 0.03802 | 0.96198 | 13.31 | 200 | 87.400 | 6.57 | 3.80 |
| 3.3 | 0.04182 | 0.95818 | 13.36 | 220 | 95.450 | 7.15 | 4.18 |
| 3.6 | 0.04562 | 0.95438 | 13.41 | 230 | 102.000 | 7.61 | 4.56 |
| 3.98 | 0.05044 | 0.94956 | 13.48 | 230 | 106.800 | 7.92 | 5.04 |



Handwritten signature

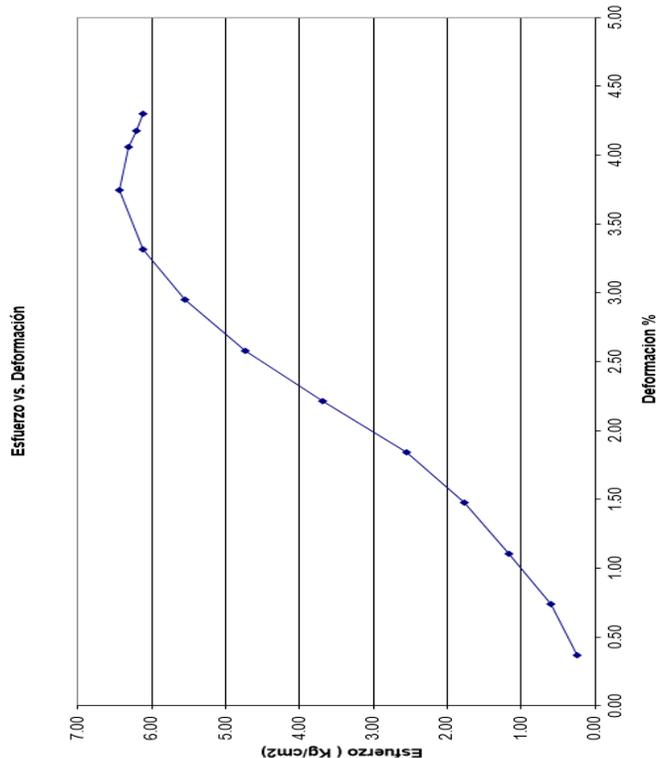


| | |
|--|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| ARCILLOSOS EXPANSIVOS | |
| COMPOSICIÓN: 95% BENTONITA+5% YESO | FECHA: 27/01/2021 |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | Nº LABORATORIO: 2 |

| | | |
|-------------|-------|----------|
| vd max | 1.355 | gr/cm3 |
| Gs: | | |
| W% | 21.88 | % |
| Ang. Rotura | | º |
| Qumax | 6.45 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

| | | |
|--------------|--------|--------|
| Diámetro | 4.026 | cm. |
| Alt. Inicial | 8.137 | cm. |
| Area | 12.73 | cm2. |
| Volumen | 103.59 | cm3. |
| P. Humedo | 171.07 | gr. |
| P. Unitario | 1.65 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.83 | cm. |

| Δh (m.m.) | ϵ | 1- ϵ | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ϵ % |
|-------------------|------------|---------------|----------|--------|--------|-------------------|--------------|
| 0.3 | 0.00369 | 0.99631 | 12.78 | 20 | 3.000 | 0.23 | 0.37 |
| 0.6 | 0.00737 | 0.99263 | 12.82 | 40 | 7.550 | 0.59 | 0.74 |
| 0.9 | 0.01106 | 0.98894 | 12.87 | 60 | 14.950 | 1.16 | 1.11 |
| 1.2 | 0.01475 | 0.98525 | 12.92 | 80 | 22.850 | 1.77 | 1.47 |
| 1.5 | 0.01843 | 0.98157 | 12.97 | 100 | 33.000 | 2.54 | 1.84 |
| 1.8 | 0.02212 | 0.97788 | 13.02 | 120 | 48.100 | 3.69 | 2.21 |
| 2.1 | 0.02581 | 0.97419 | 13.07 | 140 | 61.850 | 4.73 | 2.58 |
| 2.4 | 0.02949 | 0.97051 | 13.12 | 160 | 72.800 | 5.55 | 2.95 |
| 2.7 | 0.03318 | 0.96682 | 13.17 | 180 | 80.650 | 6.13 | 3.32 |
| 3.05 | 0.03748 | 0.96252 | 13.23 | 220 | 85.250 | 6.45 | 3.75 |
| 3.3 | 0.04056 | 0.95944 | 13.27 | 230 | 83.900 | 6.32 | 4.06 |
| 3.4 | 0.04178 | 0.95822 | 13.29 | 230 | 82.600 | 6.22 | 4.18 |
| 3.5 | 0.04301 | 0.95699 | 13.30 | 230 | 81.400 | 6.12 | 4.30 |

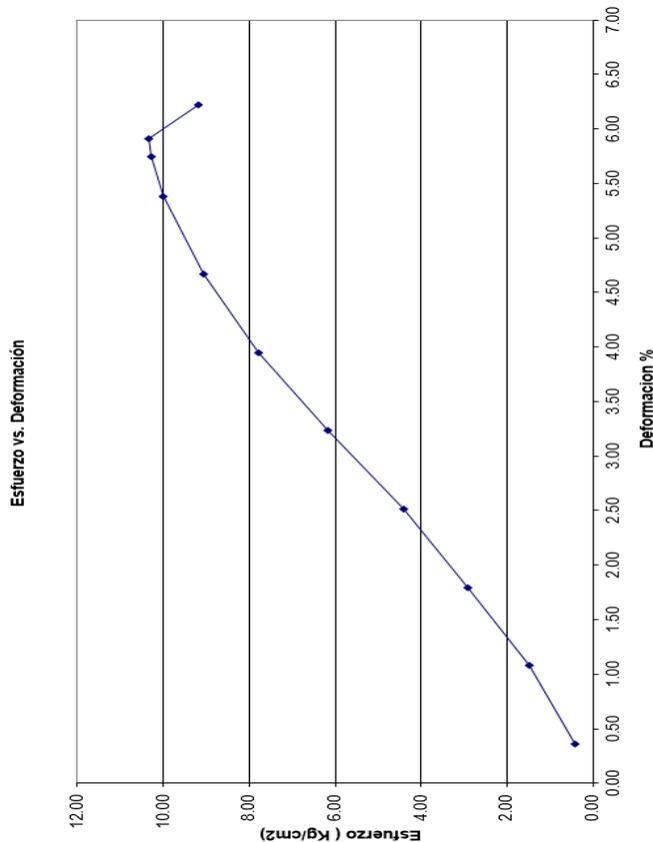


Handwritten signature

| | |
|--|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAJO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TESIS: EL YESO DE MORROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS FECHA: 27/01/2021 N° LABORATORIO 3 | |
| COMPOSICIÓN: 95% BENTONITA+5% YESO | RESULTADOS |
| TECISTA: ROBERTO MARTIN ZAMORA NEIVADO. | |

| | | | | | |
|--------------|--------|--------------------|--------------|-------|-----------------------|
| Dímetro | 4.043 | cm. | yd max | 1.458 | gr/cm3 |
| Alt. Inicial | 8.356 | cm. | Gs: | | |
| Area | 12.84 | cm ² | W% | 21.21 | % |
| Volumen | 107.27 | cm ³ | Ang. Rollura | | o |
| P. Humedo | 189.53 | gr. | Quimax | 10.34 | (Kg/cm ²) |
| P. Unillario | 1.77 | gr/cm ³ | Cohesión | | |
| Alt. Final | 7.86 | cm. | | | |

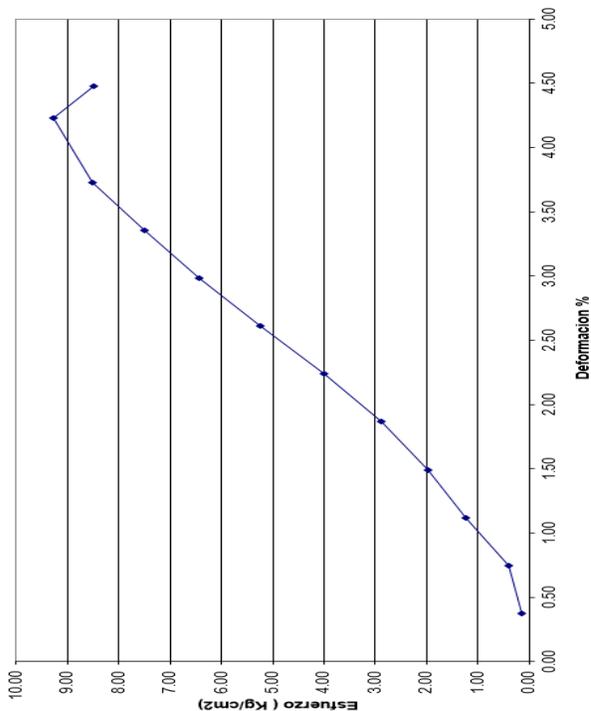
| dh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm ²) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm ²) | ε % |
|-----------|---------|---------|-----------------------|--------|---------|-------------------------|------|
| 0.3 | 0.00359 | 0.99641 | 12.88 | 20 | 5.500 | 0.43 | 0.36 |
| 0.9 | 0.01077 | 0.98923 | 12.98 | 40 | 19.050 | 1.47 | 1.08 |
| 1.5 | 0.01795 | 0.98205 | 13.07 | 60 | 37.900 | 2.90 | 1.80 |
| 2.1 | 0.02513 | 0.97487 | 13.17 | 80 | 57.950 | 4.40 | 2.51 |
| 2.7 | 0.03231 | 0.96769 | 13.27 | 100 | 81.850 | 6.17 | 3.23 |
| 3.3 | 0.03949 | 0.96051 | 13.37 | 120 | 104.150 | 7.79 | 3.95 |
| 3.9 | 0.04667 | 0.95333 | 13.47 | 140 | 121.900 | 9.05 | 4.67 |
| 4.5 | 0.05385 | 0.94615 | 13.57 | 160 | 135.750 | 10.00 | 5.39 |
| 4.8 | 0.05744 | 0.94256 | 13.62 | 180 | 139.850 | 10.27 | 5.74 |
| 4.94 | 0.05912 | 0.94088 | 13.64 | 200 | 141.050 | 10.34 | 5.91 |
| 5.2 | 0.06223 | 0.93777 | 13.69 | 220 | 125.750 | 9.19 | 6.22 |



Handwritten signature



Esfuerzo vs. Deformación



| | |
|---|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINERA, METALURGICA Y GEOGRAFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TESIS: EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | |
| FECHA: 27/01/2021 | |
| N° LABORATORI 1 | |
| DATOS | |
| RESULTADOS | |

| | | |
|-------------|-------|----------|
| yd max | 1.382 | gr/cm3 |
| Gs: | 2071 | |
| W% | 18.89 | % |
| Ang. Rotura | | ° |
| qumax | 9.27 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

| | | |
|--------------|--------|--------|
| Diámetro | 4.028 | cm. |
| Alt. Inicial | 8.047 | cm. |
| Area | 12.74 | cm2. |
| Volumen | 102.54 | cm3. |
| P. Humedo | 168.48 | gr. |
| P. Unitario | 1.64 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.71 | cm. |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (N/w) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|------------|------|
| 0.3 | 0.00373 | 0.99627 | 12.79 | 20 | 1.800 | 0.14 | 0.37 |
| 0.6 | 0.00746 | 0.99254 | 12.84 | 40 | 5.150 | 0.40 | 0.75 |
| 0.9 | 0.01118 | 0.98882 | 12.89 | 60 | 16.000 | 1.24 | 1.12 |
| 1.2 | 0.01491 | 0.98509 | 12.94 | 80 | 25.500 | 1.97 | 1.49 |
| 1.5 | 0.01864 | 0.98136 | 12.98 | 100 | 37.500 | 2.89 | 1.86 |
| 1.8 | 0.02237 | 0.97763 | 13.03 | 120 | 52.250 | 4.01 | 2.24 |
| 2.1 | 0.02610 | 0.97390 | 13.08 | 140 | 68.700 | 5.25 | 2.61 |
| 2.4 | 0.02982 | 0.97018 | 13.13 | 160 | 84.550 | 6.44 | 2.98 |
| 2.7 | 0.03355 | 0.96645 | 13.19 | 180 | 98.950 | 7.50 | 3.36 |
| 3 | 0.03728 | 0.96272 | 13.24 | 200 | 112.800 | 8.52 | 3.73 |
| 3.4 | 0.04225 | 0.95775 | 13.31 | 230 | 123.400 | 9.27 | 4.23 |
| 3.6 | 0.04474 | 0.95526 | 13.34 | 230 | 113.400 | 8.50 | 4.47 |



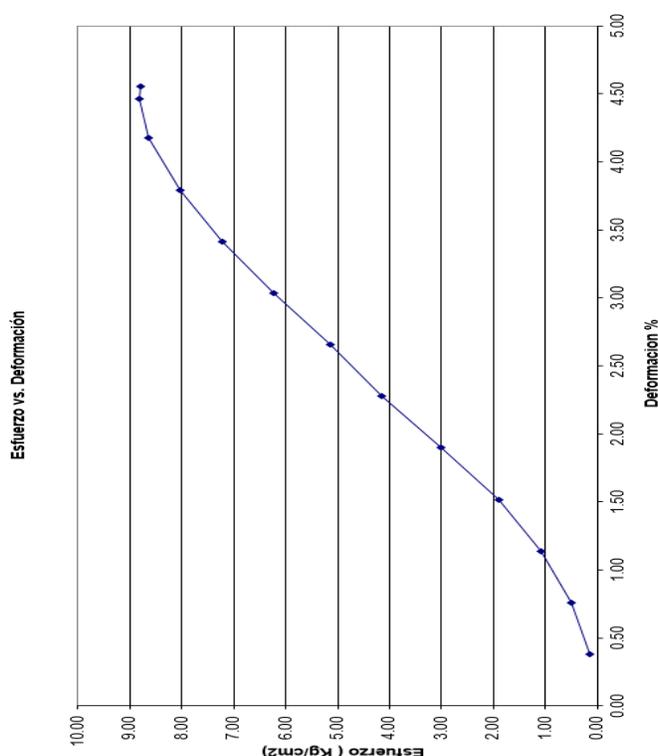
Handwritten signature

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA, METALURGICA Y GEOGRAFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TESIS: EL YESO DE MORROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | DATOS |
| COMPOSICIÓN: 92.5% BENTONITA-7.5% YESO | RESULTADOS |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEIVADO. | FECHA: 27/01/2021 |
| | Nº LABORATORIO 2 |

| | | |
|-------------|-------|----------|
| yd max | 1.381 | gr/cm3 |
| Gs: | 2071 | |
| W% | 19.61 | % |
| Ang. Rotura | | ° |
| qumax | 8.82 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

| | | |
|--------------|--------|--------|
| Diámetro | 4.077 | cm. |
| Alt. Inicial | 7.907 | cm. |
| Area | 13.05 | cm2. |
| Volumen | 103.22 | cm3. |
| P. Humedo | 170.45 | gr. |
| P. Unitario | 1.65 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.55 | cm. |

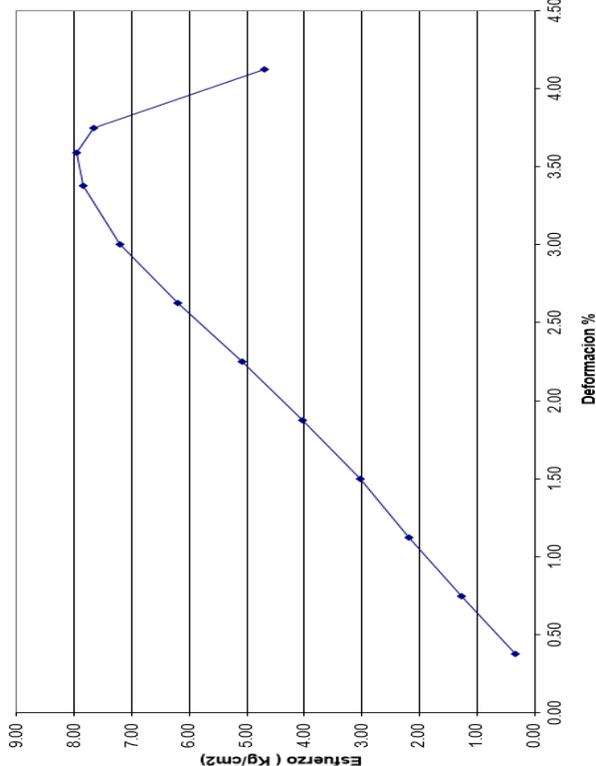
| dh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|--------|---------|------------|------|
| 0.3 | 0.00379 | 0.99621 | 13.10 | 20 | 1.850 | 0.14 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00759 | 0.99241 | 13.15 | 40 | 6.650 | 0.51 | 0.76 |
| 0.9 | 0.01138 | 0.98862 | 13.21 | 60 | 14.350 | 1.09 | 1.14 |
| 1.2 | 0.01518 | 0.98482 | 13.26 | 80 | 25.150 | 1.90 | 1.52 |
| 1.5 | 0.01897 | 0.98103 | 13.31 | 100 | 40.050 | 3.01 | 1.90 |
| 1.8 | 0.02276 | 0.97724 | 13.36 | 120 | 55.500 | 4.15 | 2.28 |
| 2.1 | 0.02656 | 0.97344 | 13.41 | 140 | 68.900 | 5.14 | 2.66 |
| 2.4 | 0.03035 | 0.96965 | 13.46 | 160 | 83.950 | 6.24 | 3.04 |
| 2.7 | 0.03415 | 0.96585 | 13.52 | 180 | 97.500 | 7.21 | 3.41 |
| 3 | 0.03794 | 0.96206 | 13.57 | 200 | 108.950 | 8.03 | 3.79 |
| 3.3 | 0.04174 | 0.95826 | 13.62 | 220 | 117.900 | 8.65 | 4.17 |
| 3.53 | 0.04464 | 0.95636 | 13.66 | 230 | 120.550 | 8.82 | 4.46 |
| 3.6 | 0.04553 | 0.95447 | 13.68 | 230 | 120.150 | 8.78 | 4.55 |



Handwritten signature



Esfuerzo vs. Deformación



R. Ramirez

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TESIS: EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | FECHA: 27/01/2021 |
| COMPOSICIÓN: 92.5% BENTONITA+7.5% YESO | Nº LABORATORIO: 3 |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | |
| | DATOS |
| | RESULTADOS |

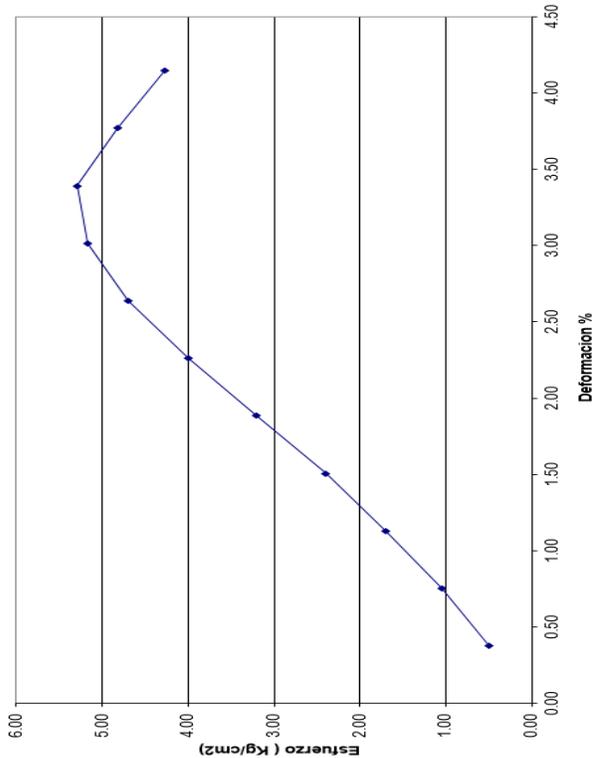
| | | |
|-------------|-------|----------|
| γd max | 1.380 | gr/cm3 |
| Gs: | - | |
| W% | 19.53 | % |
| Ang. Rotura | | ° |
| qumax | 7.95 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

| | | |
|--------------|--------|--------|
| Díámetro | 4.032 | cm. |
| Alt. Inicial | 8.002 | cm. |
| Area | 12.77 | cm2, |
| Volumen | 102.17 | cm3, |
| P. Humedo | 168.48 | gr. |
| P. Unitario | 1.65 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.72 | cm. |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|--------|---------|------------|------|
| 0.3 | 0.00375 | 0.99625 | 12.82 | 20 | 4.300 | 0.34 | 0.37 |
| 0.6 | 0.00750 | 0.99250 | 12.86 | 40 | 16.300 | 1.27 | 0.75 |
| 0.9 | 0.01125 | 0.98875 | 12.91 | 60 | 28.250 | 2.19 | 1.12 |
| 1.2 | 0.01500 | 0.98500 | 12.96 | 80 | 39.350 | 3.04 | 1.50 |
| 1.5 | 0.01875 | 0.98125 | 13.01 | 100 | 52.350 | 4.02 | 1.87 |
| 1.8 | 0.02249 | 0.97751 | 13.06 | 120 | 66.400 | 5.08 | 2.25 |
| 2.1 | 0.02624 | 0.97376 | 13.11 | 140 | 81.450 | 6.21 | 2.62 |
| 2.4 | 0.02999 | 0.97001 | 13.16 | 160 | 94.750 | 7.20 | 3.00 |
| 2.7 | 0.03374 | 0.96626 | 13.21 | 180 | 103.550 | 7.84 | 3.37 |
| 2.87 | 0.03587 | 0.96413 | 13.24 | 200 | 105.300 | 7.95 | 3.59 |
| 3 | 0.03749 | 0.96251 | 13.27 | 220 | 101.600 | 7.66 | 3.75 |
| 3.3 | 0.04124 | 0.95876 | 13.32 | 230 | 62.550 | 4.70 | 4.12 |



Esfuerzo vs. Deformación



| | | |
|---|---|-------------------|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. | |
| | ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | |
| TESIS: EL YESO DE MORROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | DATOS | |
| COMPOSICIÓN: 90% BENTONITA+10% YESO | RESULTADOS | |
| TESISTA: ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO. | FECHA: 27/01/2021 | Nº LABORATORIO: 1 |

| | | |
|--------------|--------|--------------------|
| Diámetro | 4.039 | cm. |
| Alt. Inicial | 7.961 | cm. |
| Area | 12.81 | cm ² . |
| Volumen | 102.00 | cm ³ . |
| P. Humedo | 163.45 | gr. |
| P. Uniflorio | 1.60 | gr/cm ³ |
| Alt. Final | 7.69 | cm. |

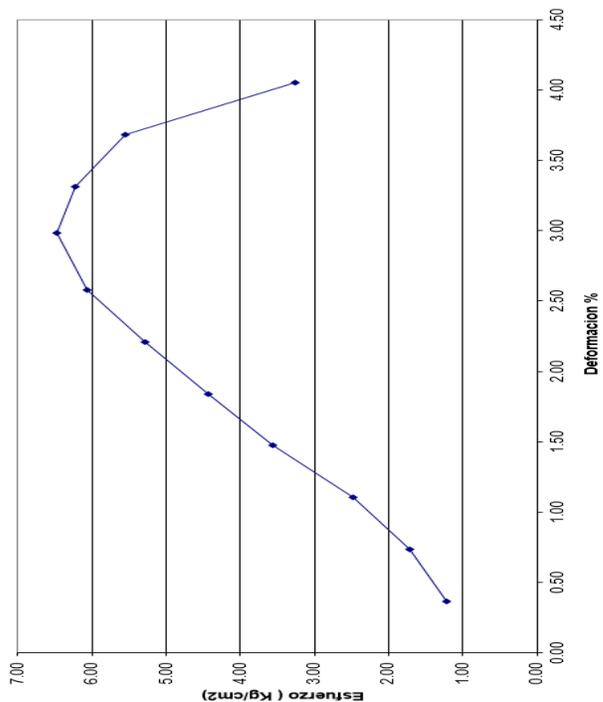
| | | |
|-------------|-------|-----------------------|
| yd max | 1.342 | gr/cm ³ |
| Gs: | 2071 | |
| W% | 19.37 | % |
| Ang. Rotura | | ° |
| qumax | 5.29 | (Kg/cm ²) |
| Cohesión | | |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm ²) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm ²) | ε % |
|-----------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|-------------------------|------|
| 0.3 | 0.00377 | 0.99623 | 12.86 | 6.300 | 0.49 | 0.38 | 0.38 |
| 0.6 | 0.00754 | 0.99246 | 12.91 | 13.400 | 1.04 | 0.75 | 0.75 |
| 0.9 | 0.01131 | 0.98869 | 12.96 | 21.950 | 1.69 | 1.13 | 1.13 |
| 1.2 | 0.01507 | 0.98493 | 13.01 | 31.250 | 2.40 | 1.51 | 1.51 |
| 1.5 | 0.01884 | 0.98116 | 13.06 | 41.800 | 3.20 | 1.88 | 1.88 |
| 1.8 | 0.02261 | 0.97739 | 13.11 | 52.400 | 4.00 | 2.26 | 2.26 |
| 2.1 | 0.02638 | 0.97362 | 13.16 | 61.900 | 4.70 | 2.64 | 2.64 |
| 2.4 | 0.03015 | 0.96985 | 13.21 | 68.300 | 5.17 | 3.01 | 3.01 |
| 2.7 | 0.03392 | 0.96608 | 13.26 | 70.100 | 5.29 | 3.39 | 3.39 |
| 3 | 0.03768 | 0.96232 | 13.31 | 64.200 | 4.82 | 3.77 | 3.77 |
| 3.3 | 0.04145 | 0.95855 | 13.37 | 57.000 | 4.26 | 4.15 | 4.15 |

R Zamora



Estuerzo vs. Deformación



| DATOS | |
|------------|--|
| RESULTADOS | |

| | | | |
|---|--|---|--|
| UNIDAD DE POSGRADO | | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA. | |
| ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE | | | |
| TESIS: EL YESO DE MÓRROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | | | |
| COMPOSICIÓN: 80% BENTONITA+10% YESO | | FECHA: 27/01/2021 | |
| TESISTA: ROBERTO MARTIN ZAMORA NEVADO. | | N° LABORATORIO: 2 | |

| | | |
|-------------|-------|----------|
| yd max | 1.358 | gr/cm3 |
| Gs: | 2071 | |
| W% | 20.28 | % |
| Ang. Rotura | 57 | ° |
| Quimax | 6.47 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

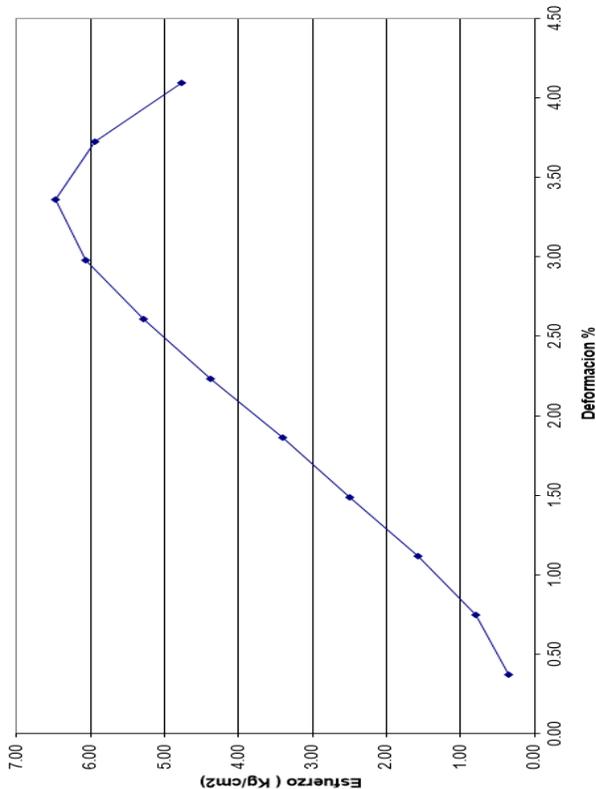
| | | |
|--------------|--------|--------|
| Diámetro | 4.046 | cm. |
| Alt. Inicial | 8.15 | cm. |
| Area | 12.86 | cm2. |
| Volumen | 104.79 | cm3. |
| P. Humedo | 171.13 | gr. |
| P. Unitario | 1.63 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.91 | cm. |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|--------|--------|------------|-----|
| 0.3 | 0.00368 | 0.99632 | 12.90 | 15.600 | 1.21 | 0.37 | |
| 0.6 | 0.00736 | 0.99264 | 12.95 | 22.300 | 1.72 | 0.74 | |
| 0.9 | 0.01104 | 0.98896 | 13.00 | 32.250 | 2.48 | 1.10 | |
| 1.2 | 0.01472 | 0.98528 | 13.05 | 46.550 | 3.57 | 1.47 | |
| 1.5 | 0.01840 | 0.98160 | 13.10 | 58.100 | 4.44 | 1.84 | |
| 1.8 | 0.02209 | 0.97791 | 13.15 | 69.600 | 5.29 | 2.21 | |
| 2.1 | 0.02577 | 0.97423 | 13.20 | 79.950 | 6.06 | 2.58 | |
| 2.43 | 0.02982 | 0.97018 | 13.25 | 85.800 | 6.47 | 2.98 | |
| 2.7 | 0.03313 | 0.96687 | 13.30 | 82.900 | 6.23 | 3.31 | |
| 3 | 0.03681 | 0.96319 | 13.35 | 74.150 | 5.55 | 3.68 | |
| 3.3 | 0.04049 | 0.95951 | 13.40 | 43.700 | 3.26 | 4.05 | |



Handwritten signature

Estuerzo vs. Deformación



Handwritten signature

| | | | |
|---|--|-------------------|---|
| UNIDAD DE POSGRADO | UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS | DATOS | |
| FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLOGICA, MINERA, METALURGICA Y GEOGRAFICA. | | RESULTADOS | |
| ENSAJO DE COMPRESIÓN SIMPLE | | | |
| TESIS: EL YESO DE MORROPE COMO ADITIVO ALTERNATIVO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS EXPANSIVOS | | | |
| COMPOSICIÓN: 90% BENTONITA+10% YESO | | FECHA: 27/01/2021 | |
| TESISTA: ROBERTO MARTIN ZAMORA NEVADO. | | Nº LABORATORI | 3 |

| | | |
|--------------|-------|----------|
| vd max | 1.356 | gr/cm3 |
| Gs: | 2071 | |
| W% | 18.61 | % |
| Ang. Rollura | | º |
| qumax | 6.48 | (Kg/cm2) |
| Cohesión | | |

| | | |
|--------------|--------|--------|
| Diámetro | 4.046 | cm. |
| Alt. Inicial | 8.061 | cm. |
| Area | 12.86 | cm2. |
| Volumen | 103.64 | cm3. |
| P. Humedo | 166.67 | gr. |
| P. Unitario | 1.61 | gr/cm3 |
| Alt. Final | 7.79 | cm. |

| Δh (m.m.) | ε | 1-ε | Ac (cm2) | C (Nw) | C (kg) | σ (Kg/cm2) | ε % |
|-----------|---------|---------|----------|--------|--------|------------|------|
| 0.3 | 0.00372 | 0.99628 | 12.91 | 20 | 4.550 | 0.35 | 0.37 |
| 0.6 | 0.00744 | 0.99256 | 12.95 | 40 | 10.150 | 0.78 | 0.74 |
| 0.9 | 0.01116 | 0.98884 | 13.00 | 60 | 20.550 | 1.58 | 1.12 |
| 1.2 | 0.01489 | 0.98511 | 13.05 | 80 | 32.550 | 2.49 | 1.49 |
| 1.5 | 0.01861 | 0.98139 | 13.10 | 100 | 44.650 | 3.41 | 1.86 |
| 1.8 | 0.02233 | 0.97767 | 13.15 | 120 | 57.800 | 4.38 | 2.23 |
| 2.1 | 0.02605 | 0.97395 | 13.20 | 140 | 69.800 | 5.29 | 2.61 |
| 2.4 | 0.02977 | 0.97023 | 13.25 | 160 | 80.350 | 6.06 | 2.98 |
| 2.71 | 0.03352 | 0.96658 | 13.30 | 200 | 86.200 | 6.48 | 3.36 |
| 3 | 0.03722 | 0.96278 | 13.35 | 220 | 79.250 | 5.93 | 3.72 |
| 3.3 | 0.04094 | 0.95906 | 13.41 | 230 | 64.050 | 4.78 | 4.09 |



Anexo 8.Tabla de Mejoras Efectivas

| Dosificación | Resistencia a la Compresión Simple (Kg-f/cm ²) |
|---|--|
| Bentonita al 100% | 4,02 |
| Yeso 7.5% Bentonita 92.5% | 8,68 |
| Incremento (%) | 115,92 |
| Observaciones: adiciones superiores al 7,5% de yeso muestran una tendencia reversible, reduciéndose la resistencia de la bentonita. | |

| Dosificación | Límites de consistencia (%) | |
|---|-----------------------------|-----------------------|
| | Límite Líquido | Índice de Plasticidad |
| Bentonita al 100% | 155,92 | 121,66 |
| Yeso 7,5% Bentonita 92,5% | 116,06 | 88,36 |
| Reducción % | 25,56 | 27,37 |
| Observaciones: adiciones superiores al 7,5% de yeso muestran una tendencia reversible, incrementando el límite líquido e índice de plasticidad de la bentonita. | | |

| Dosificación | Índice de Expansión Libre (%) |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Bentonita al 100% | 685,7 |
| Yeso 10% Bentonita 90% | 166,7 |
| Reducción (%) | 75,69 |

| Dosificación | Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g) |
|---------------------------|---|
| Bentonita al 100% | 70,8 |
| Yeso 10% Bentonita 90% | 11 |
| Reducción (%) | 84,46 |



COMUNIDAD CAMPESINA "SAN PEDRO" - MÓRROPE

RECONOCIDA POR RESOLUCIÓN SUPREMA N° 14 DEL 05 DE MARZO DE 1951



"Año de lucha contra la violencia hacia las mujeres y la erradicación del feminicidio"

Mórrope, 09 de enero del 2019.

CARTA N° 004-2019-CCSPM/P

SEÑOR : ING. ROBERTO MARTÍN ZAMORA NEVADO
Mz. C Lote 06 Urb. "Sol de Pimentel", Pimentel
Provincia de Chiclayo

ASUNTO : Autorización para ingresar a las minas al Km 48 para obtener las muestras que solicita en el documento de la referencia.

REFERENCIA: Documento de expediente N° 0001, de fecha 07/01/19

Por intermedio de la presente, le hago llegar mi cordial saludo en representación de la Secretaría de Actividades Mineras de la Comunidad Campesina San Pedro de Mórrope, para luego expresarle lo siguiente:

Que, habiendo recepcionado el documento de la referencia, autorizo mediante la presente ingresar a las minas de yeso del Km 48 para obtener las muestras que solicita para la realización de su proyecto de tesis "El yeso de Mórrope como aditivo alternativo para la estabilización de suelos arcillosos expansivos.

Con las consideraciones del caso, quedo de Ud.

Atentamente.

COMUNIDAD CAMPESINA
SAN PEDRO DE MÓRROPE
Juan José Sánchez
Juan José Sánchez
SECRETARÍA DE ACTIVIDADES MINERAS

*La Comunidad
Siempre Contigo...!!*