

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS
EXPANSIVOS PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE
TALARA, PIURA.**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

DIEGO ANDRÉ SÁNCHEZ MOROTE

ID: 0000-0002-6174-6485

ASESOR

MSc. CÉSAR AUGUSTO ATALA ABAD

ID: 0001-6781-703X

LIMA- PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Sánchez Morote, Diego André

dsanchezm@[uni.pe](mailto:dsanchezm@uni.pe)

958344449

DEDICATORIA

A mis padres, hermana y a mi familia especialmente a mi madre Mónica por su esfuerzo y apoyo incondicional, a mi padre Wilber por sus consejos y a mi novia Sandra por su constante motivación en poder culminar esta etapa de mi carrera profesional que es la tesis.

AGRADECIMIENTO

A través de estas líneas deseo expresar mi agradecimiento al MSc. César Augusto Atala Abad por su asesoramiento e información a lo largo del desarrollo de este estudio.

Quiero agradecer a la empresa Marjent Engineering Lab S.A.C. por brindarme sus instalaciones para el uso de sus equipos y también a los técnicos José Reyes, Omar Huerta y Celina Amaringo por el apoyo en el correcto desarrollo de los ensayos para la presente tesis.

De igual manera un agradecimiento especial al Ing. Daniel Basurto Ravichagua, quién ha sido mentor y maestro brindándome sus consejos que me sirvieron como guía a lo largo de este estudio y para mi desarrollo en el ámbito profesional de la carrera.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract.....	5
Prólogo.....	6
Lista de tablas	7
Lista de figuras.....	9
Lista de símbolos y siglas	11
Capítulo I: Introducción	12
1.1. Generalidades	12
1.2. Problemática.....	12
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo General.....	14
1.3.2. Objetivos Específicos	14
1.4. Hipótesis.....	14
Capítulo II: Marcos Teórico y Conceptual	15
2.1. Conceptos Fundamentales	15
2.1.1. Suelos Expansivos	15
2.1.2. Estabilización de suelos.....	16
2.2. Tipos de estabilización de suelos	16
2.2.1. Estabilización física y mecánica.....	17
2.2.2. Estabilización química	19
2.2.2.1. Estabilización con cal	19
2.2.2.2. Estabilización con cemento	23
Capítulo III: Ensayos al Suelo Natural.....	26

3.1.	Origen de la muestra a analizar	26
3.1.1.	Situación geográfica	26
3.1.2.	Ubicación.....	26
3.2.	Ensayos de laboratorio	28
3.2.1.	Contenido de Humedad	28
3.2.2.	Análisis Granulométrico por Tamizado	29
3.2.3.	Análisis Granulométrico por Sedimentación.....	30
3.2.4.	Límites de Consistencia.....	31
3.2.4.1.	<i>Límite Líquido</i>	31
3.2.4.2.	<i>Límite Plástico</i>	31
3.2.4.3.	<i>Límite de Contracción</i>	31
3.2.5.	Gravedad Específica de Sólidos	32
3.2.6.	Compactación Proctor Modificado	32
3.2.7.	Compresión Simple no confinada	33
3.2.8.	Expansión Libre y Controlada	34
3.2.9.	Difracción de Rayos X	36
Capítulo IV: Ensayos al suelo con cal		38
4.1.	Dosificaciones 4%, 5% y 7% de cal	39
4.1.1.	Análisis Granulométrico por Sedimentación.....	39
4.1.2.	Límites de Consistencia.....	39
4.1.3.	Proctor Modificado.....	40
4.1.4.	Expansión Libre	41
4.1.5.	Compresión Simple no confinada	43
Capítulo V: Ensayos al suelo con cemento		44
5.1.	Dosificaciones 1% y 2% de cemento + %optimo cal	46
5.1.1.	Análisis Granulométrico por Sedimentación.....	47

5.1.2.	Límites de Consistencia.....	47
5.1.3.	Proctor Modificado.....	47
5.1.4.	Expansión Libre.....	48
5.1.5.	Compresión Simple no confinada	49
Capítulo VI: Análisis de resultados.....		51
6.1.	Clasificación SUCS y AASHTO	51
6.2.	Reconocimiento del suelo expansivo.....	51
6.2.1.	Identificación Mineralógica.....	52
6.2.2.	Método Indirecto	52
6.2.3.	Método Directo	55
6.3.	Estabilización con cal y cemento	57
6.3.1.	Análisis de Límites de Atterberg.....	57
6.3.2.	Análisis de dosificación de cal	63
6.3.2.1.	<i>Compactación</i>	63
6.3.2.2.	<i>Expansión libre</i>	65
6.3.2.3.	<i>Compresión Simple</i>	68
6.3.3.	Análisis de dosificación de cemento	68
6.3.3.1.	<i>Compactación</i>	68
6.3.3.2.	<i>Expansión libre</i>	70
6.3.3.3.	<i>Compresión Simple</i>	72
Conclusiones.....		73
Recomendaciones.....		74
Referencias Bibliográficas.....		76
Anexos		78

RESUMEN

Los suelos de la ciudad de Talara presentan propiedades expansivas además las condiciones climáticas y geológicas favorecen la activación del potencial expansivo, el clima seco que predomina es interrumpido por las épocas de lluvias generados por el fenómeno del Niño ocasionando que el suelo de la zona presente cambios de volumen que afecta a las cimentaciones de obras de ingeniería.

Para la identificación del suelo expansivo de la ciudad de Talara se realizó distintas metodologías tales como: identificación mineralógica que consto de ensayo de difracción de rayos x, métodos indirectos en los cuales se realizó ensayos para determinar las propiedades del suelo tales como límites de Atterberg y contenido de arcillas, y los métodos directos en el cual se realizó ensayo de expansión libre y controlada los cuales determinaron que la zona estudiada presenta un potencial expansivo muy alto.

En este sentido se buscó investigar como estabilizar al suelo expansivo mediante la adición de un agente estabilizador, para ello se utilizó la cal viva y el cemento portland tipo HS, analizando en primer lugar el efecto de estos materiales en la plasticidad del suelo, agregando gradualmente porcentajes de cal y de cemento para definir las dosificaciones a realizar en los demás ensayos.

Definido las dosificaciones que fueron en el caso de la cal de 4%, 5% y 7% respecto al peso seco del suelo, se realizaron los ensayos de granulometría, límites de consistencia, compactación, expansión libre y compresión simple, se analizó la variación en las propiedades del suelo con la cal en la cual hubo una reducción de hasta un 68.3% del %expansión libre del suelo y se determinó el %Optimo de cal para el suelo analizado mediante la curva de %expansión vs %cal.

Posteriormente se optó por utilizar el %Optimo de cal obtenido agregando 1% y 2% de cemento respecto al peso seco del suelo (ya que por sí solo no es buen agente estabilizador para los suelos arcillosos) realizando los mismos ensayos de la mezcla suelo-cal se obtuvo una reducción de hasta 89.5% del %expansión libre, además que se determinó el %Optimo de cemento.

Finalmente, se concluye que la mezcla de suelo-cal y suelo-cemento (agregando previamente un %cal) es buen agente estabilizador para el suelo de la ciudad de Talara, además que el %Optimo de cal determinado fue de 5.5% y %Óptimo de cemento fue de 2.0%

ABSTRACT

The soils of the city of Talara have expansive properties, in addition, the climatic and geological conditions favor the activation of the expansive potential, the dry climate that predominates is interrupted by the rainy seasons generated by the El Niño phenomenon, causing the soil in the area to present changes of volume that affects the foundations of engineering works.

For the identification of the expansive soil of the city of Talara, different methodologies were carried out such as: mineralogical identification that consisted of x-ray diffraction testing, indirect methods in which tests were carried out to determine the properties of the soil such as Atterberg limits and clay content, and the direct methods in which a free and controlled expansion test was carried out, which determined that the studied area has a very high expansion potential.

In this sense, we sought to investigate how to stabilize expansive soil by adding a stabilizing agent. For this purpose, quicklime and HS type Portland cement were used, first analyzing the effect of these materials on the plasticity of the soil, gradually adding percentages of lime and cement to define the dosages to be carried out in the other tests.

Once the dosages were defined, which in the case of lime were 4%, 5% and 7% with respect to the dry weight of the soil, the granulometry, consistency limits, compaction, free expansion and simple compression tests were carried out, the variation was analyzed in the properties of the soil with lime in which there was a reduction of up to 68.3% of the free expansion of the soil % and the Optimum % of lime for the soil analyzed was determined using the expansion % vs lime % curve.

Subsequently, it was decided to use the Optimum % of lime obtained by adding 1% and 2% of cement with respect to the dry weight of the soil (since by itself it is not a good stabilizing agent for clay soils) carrying out the same tests of the soil-lime mixture, a reduction of up to 89.5% of the free expansion % was obtained, in addition to determining the Optimum % of cement.

Finally, it is concluded that the mixture of soil-lime and soil-cement (previously adding a lime%) is a good stabilizing agent for the soil of the city of Talara, in addition that the Optimal % of lime determined was 5.5% and Optimal % of cement was 2.0.

PRÓLOGO

En toda obra de ingeniería es de suma importancia los estudios básicos en los cuales se plantean las pautas de desarrollo de los estudios definitivos de ingeniería de acuerdo al objeto del proyecto, dentro de estos estudios básicos se encuentra el de geotecnia. En esa línea, la presente tesis se enfoca en el estudio del suelo expansivo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara que viene presentando daños a las infraestructuras tales como viviendas, pistas, veredas, colegios, etc.

El Bachiller Diego André Sánchez Morote para la obtención del título profesional como Ingeniero Civil, desarrolla la presente tesis tomando como referencia a distintos autores e investigadores sobre el tema de suelos expansivos y el marco normativo respectivo, y lo aplica a la muestra de suelo del lugar a través de ensayos físicos y mecánicos en laboratorio.

A diferencia de otras investigaciones y/o estudios que se centran en controlar la resistencia, en la presente investigación el tesista lo enfoca en el control de la estabilidad volumétrica, que busca mitigar el hinchamiento del suelo mediante la adición de cal y cemento, mostrando el proceso en sus diferentes etapas hasta lograr obtener el porcentaje óptimo de cal y el porcentaje óptimo de cemento.

Este enfoque de control volumétrico en suelos expansivos de la presente tesis puede ser tomado como referencia para otras investigaciones en las que se estudien suelos con propiedades expansivas de otros lugares.

Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla N°1: Ventajas y desventajas de las formas de presentación de la cal	21
Tabla N°2: Datos de exploración	26
Tabla N°3: Contenido de Humedad del Suelo Natural	29
Tabla N°4: Granulometría por tamizado del Suelo Natural.....	30
Tabla N°5: Granulometría por sedimentación del Suelo Natural	30
Tabla N°6: Límites de Atterberg del Suelo Natural	32
Tabla N°7: Gravedad Específica de Sólidos del Suelo Natural	32
Tabla N°8: Datos de ensayo Proctor Modificado del Suelo Natural.....	33
Tabla N°9: Datos de ensayo Compresión Simple no confinada del Suelo Natural	34
Tabla N°10: Datos de ensayo Expansión del Suelo Natural.....	36
Tabla N°11: Datos de ensayo de Difracción de rayos X.....	37
Tabla N°12: Datos de caracterización de Cal.....	38
Tabla N°13: Datos de límites en función del porcentaje de cal	38
Tabla N°14: Granulometría del suelo con 4%, 5% y 7% de cal.....	39
Tabla N°15: Límites de Atterberg del suelo con 4%, 5% y 7% de cal	39
Tabla N°16: M.D.S. y O.C.H. del suelo con 4%, 5% y 7% de cal	40
Tabla N°17: Expansión libre del suelo con 4%, 5% y 7% de cal	42
Tabla N°18: Compresión Simple no confinada del suelo con 4%, 5% y 7% de cal	43
Tabla N°19: Ensayos químicos del suelo	44
Tabla N°20: Elementos químicos nocivos al concreto.....	44
Tabla N°21: Datos de límites en función del porcentaje de cemento	45
Tabla N°22: Datos de límites en función del porcentaje de 2%cal + cemento	46
Tabla N°23: Granulometría del suelo con 1% y 2% de cemento	47
Tabla N°24: Límites de Atterberg del suelo con 1% y 2% de cemento	47
Tabla N°25: M.D.S. y O.C.H. del suelo con 1% y 2% de cemento	48
Tabla N°26: Expansión libre del suelo con 1% y 2% de cemento	49
Tabla N°27: Compresión Simple no confinada del suelo con 1% y 2% de cemento	50
Tabla N°28: Propiedades de límites y granulometría del suelo natural	51
Tabla N°29: Relación Índice Plástico y Potencial de Hinchamiento	52
Tabla N°30: Relación límite de contracción y Grado de Expansión.....	53
Tabla N°31: Relación límite de contracción, índice plástico y Probabilidad	

de cambio de volumen	53
Tabla N°32: Relación índice de contracción y Potencial de hinchamiento	53
Tabla N°33: Relación índice de plasticidad, límite de contracción y Probabilidad de cambio de volumen.....	54
Tabla N°34: Datos de ensayos de expansión libre.....	56
Tabla N°35: Método directo para determinación de potencial de expansión	57
Tabla N°36: Resumen de Limites de Atterberg	58
Tabla N°37: Resumen de Cálculo de Índice de Fluidez e Índice de Tenacidad..	60
Tabla N°38: Resumen de ensayo Proctor Modificado de las mezclas suelo-cal	64
Tabla N°39: Resumen de datos de expansión libre de las mezclas suelo-cal	67
Tabla N°40: Resumen de datos de compresión simple de las mezclas suelo-cal	68
Tabla N°41: Resumen de ensayo Proctor Modificado de las mezclas suelo-cal	69
Tabla N°42: Resumen de datos de expansión libre de las mezclas suelo-cemento	71
Tabla N°43: Resumen de datos de compresión simple de las mezclas suelo-cemento	72

LISTA DE FIGURAS

Figura N°1: Tipos de estabilización de suelos.....	17
Figura N°2: Método Terra-Probe.....	18
Figura N°3: Efecto de la cal en las propiedades plásticas del suelo.....	22
Figura N°4: Alternativas de estabilización de suelos.....	24
Figura N°5: Vista Frontal de la C-1.	26
Figura N°6: Vista de perfil de la C-1.....	27
Figura N°7: Vista Frontal de la C-2.	27
Figura N°8: Vista de perfil de la C-2.....	28
Figura N°9: Material tipo lutita extraído de las exploraciones.....	28
Figura N°10: Curva granulométrica del suelo natural.....	31
Figura N°11: Curva de compactación del suelo natural	33
Figura N°12: Curva esfuerzo-deformación del suelo natural	34
Figura N°13: Ensayo de expansión con carga controlada, a) Curva de expansión libre, b) etapa de consolidación	36
Figura N°14: Curva de ensayos de límites del suelo en función de la variación del porcentaje de cal añadido.....	38
Figura N°15: Curva de ensayo Proctor modificado con 4%, 5% y 7% de cal	40
Figura N°16: Remoldeo de espécimen	41
Figura N°17: Extracción de mezcla luego de 7 días sumergido en agua.....	42
Figura N°18: Especímenes tallados de la muestra extraída, a) compresión simple, b) expansión libre	42
Figura N°19: Curva de ensayos de límites del suelo en función de la variación del porcentaje de cemento añadido.....	45
Figura N°20: Curva de ensayos de límites del suelo en función de la variación del porcentaje 2%cal+cemento añadido.....	46
Figura N°21: Curva de ensayo Proctor modificado con 1% y 2% de cemento ...	48
Figura N°22: Especímenes tallados de la muestra extraída, a) compresión simple, b) expansión libre	49
Figura N°23: Ubicación de Límite Líquido e Índice de Plasticidad en la carta de plasticidad	51
Figura N°24: Clasificación del potencial expansivo del suelo.....	55
Figura N°25: Curva de Expansión libre	56
Figura N°26: Comparación de Límite Líquido cal, cemento	58
Figura N°27: Comparación de Límite Plástico cal, cemento.....	58

Figura N°28: Comparación de Índice Plástico cal, cemento.....	59
Figura N°29: Gráficos de I_F e I_T vs %Cal, a) Curva de Índice de Fluidez, b) Curva de Índice de Tenacidad	61
Figura N°30: Gráficos de I_F e I_T vs %Cemento, a) Curva de Índice de Fluidez, b) Curva de Índice de Tenacidad	62
Figura N°31: Gráficos de I_F e I_T vs %Cemento+2%Cal, a) Curva de Índice de Fluidez, b) Curva de Índice de Tenacidad	62
Figura N°32: Gráficos de variación de M.D.S y O.C.H, a) M.D.S. vs %Cal, b) O.C.H. vs %Cal.....	64
Figura N°33: Curva de Expansión libre del Suelo natural.....	65
Figura N°34: Curva de Expansión libre del Suelo + 4%cal.....	65
Figura N°35: Curva de Expansión libre del Suelo + 5%cal.....	66
Figura N°36: Curva de Expansión libre del Suelo + 7%cal.....	66
Figura N°37: Curva de %Expansión libre vs %cal.....	67
Figura N°38: Curva de Resistencia vs %cal.....	68
Figura N°39: Gráficos de variación de M.D.S y O.C.H, a) M.D.S. vs %Cemento, b) O.C.H. vs %Cemento	69
Figura N°40: Curva de Expansión libre del Suelo + 1%cemento.....	70
Figura N°41: Curva de Expansión libre del Suelo + 2%cemento.....	70
Figura N°42: Curva de %Expansión libre vs %cemento.....	71
Figura N°43: Curva de Resistencia vs %cemento.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A: Actividad

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ACI: American Concrete Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

Gs: Gravedad Especifica de Sólidos

IC: Índice de Contracción

I_F: Índice de Fluidez

IP: Índice de Plasticidad

I_T: Índice de Tenacidad

LC: Límite de Contracción

LL: Límite Líquido

LP: Límite Plástico

MDS: Máxima Densidad Seca

OCH: Óptimo Contenido de Humedad

q_u: Resistencia ultima no drenada

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

XRD: Difracción de Rayos X

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

En la actualidad muchos suelos expansivos ya sea para ser usado como suelo de fundación o como material de base o sub-base son estabilizados mediante procesos químicos como son la adición de cal y/o cemento, estos son analizados en sus propiedades de resistencia mas no en su potencial expansivo que pueda presentar, ya que la estabilización que se realiza a un suelo o material de cantera arcilloso encontrado en estado húmedo resulta un factor desfavorable para la activación del potencial expansivo.

En la presente investigación busca mostrar el efecto de la adición de la cal y cemento como método de estabilización para un suelo expansivo, así también determinar el porcentaje óptimo que se debe utilizar para controlar el potencial expansivo de este tipo de suelo.

1.2. PROBLEMÁTICA

En el mundo existen países, que cuentan con diversidad de tipos de suelos entre estos los suelos expansivos, en el país del Ecuador específicamente en la provincia de Manabí, existen suelos expansivos que generan problemas geotécnicos en la construcción de pavimentos y diferentes obras civiles, los minerales predominantes son la montmorillonita, la caolinita y las ilitas que al absorber agua sufren un cambio volumétrico generando daños importantes en las obras civiles, para mitigar los daños generados se usa distintos métodos de estabilización tales como mecánicos, físicos y químicos; este último tipo de estabilización consiste en la adición de productos químicos los cuales pueden ser la adición de cal o cemento, con la finalidad de reducir los daños futuros a una obra civil. (Sanchez, 2014).

México es otro de los países que presenta suelos expansivos, aproximadamente un 12% de su territorio son depósitos de arcillas con potencial expansivo, a lo largo de su historia las carreteras que se han construido sobre este tipo de suelos han presentado daños típicos en el pavimento tales como elevación o descenso de la superficie de rodamiento, agrietamiento longitudinal o deformaciones significativas esto es debido a que no había un correcto estudio de este tipo de suelo y un desconocimiento de los métodos de estabilización que actualmente se conocen. (Vasquez, 2014)

En España existen zonas como la ciudad de Sevilla donde existen viviendas y/o edificaciones que presentan daños estructurales y que han sido ocasionados principalmente por el asentamiento diferencial a consecuencia del suelo expansivo que fue utilizado como terreno de fundación (Carrero, 2018). En Colombia en la ciudad de Tunja a lo largo de los años hubo un crecimiento en la construcción de viviendas y que luego disminuyó debido a que no hubo un buen estudio del suelo expansivo que existe en esta zona y que posteriormente ocasiono pérdidas económicas (Hernández, 2021).

En el Perú los suelos expansivos se encuentran ubicados en la zona norte y nororiente de su territorio, como son las ciudades de Tumbes, Talara, Chiclayo y Bayóvar; en estas son zonas se han reportado distintos problemas generados debido a la expansión de los suelos encontrados y que afectan principalmente a edificaciones y construcciones hidráulicas; también se ha presentado la existencia de suelos expansivos en la zona sierra norte en el área de Jaén y Chamaya donde existen condiciones geológicas para la posible existencia de suelos expansivos en lugares no específicos; en la zona de selva se han encontrado suelos expansivos pero que cuentan con condiciones desfavorables para que se produzca la expansión, esto es debido a que las condiciones climáticas que se producen durante todo el año hacen que la humedad del suelo sea alta y no genere la activación de estos suelos expansivos. (Rojas y Alva, 2006)

Los suelos ubicados en la ciudad de Talara presentan un alto grado de expansión debido a las condiciones climáticas que son secas, los problemas generados en las cimentaciones debido a este suelo son ocasionados por la variación de humedad debido a precipitaciones cíclicas ocasionadas por el Fenómeno del Niño, la alta expansividad que presenta los suelos de Talara es debido a la alta presencia de montmorillonita en la composición mineralógica de estos suelos. (Castro, 1992)

En base a lo expuesto en los párrafos anteriores en que se menciona que los suelos expansivos son perjudiciales en la construcción de obras civiles, por lo que es de mucha importancia el análisis detallado de estos suelos ya que un mal estudio de ellos puede generar pérdidas económicas a la hora de realizar un proyecto de construcción. En la presente tesis se estudiará el efecto de la adición de cal y cemento en los suelos provenientes de la ciudad de Talara para mitigar los problemas ocasionados por estos suelos, debido a que en esta zona de estudio

las condiciones climáticas y geológicas favorecen la actividad de expansión de estos suelos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Estabilizar un suelo expansivo proveniente de la ciudad de Talara mediante la adición de cal y cemento con la finalidad de reducir el potencial expansivo del suelo

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar el porcentaje de cal óptimo que se debe adicionar al suelo expansivo
- Determinar el porcentaje de cemento óptimo que se debe adicionar al suelo expansivo

1.4. HIPÓTESIS

El potencial expansivo del suelo proveniente de la ciudad de Talara puede reducirse mediante la adición de cal o cemento en diferentes dosificaciones para así poder determinar el porcentaje de cal óptimo y cemento óptimo lo cual proporcionara datos beneficiosos acordes con la zona estudiada.

CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1.1. Suelos Expansivos

La Norma CE.020, suelos y taludes lo define como: “Un suelo que al ser humedecido sufre una expansión que pone en peligro a las estructuras cimentadas”.

Según (Behzad, 2012), los suelos expansivos suelen ser aquellos suelos que se hinchan cuando se someten a humedades o se saturan parcialmente. Además, este tipo de suelos se encogen debido a la pérdida de contenido de humedad. Por lo general, sus índices de plasticidad son altos y sus capacidades de carga difieren cuando se humedecen y cuando se secan. Estos suelos se encuentran principalmente en zonas áridas y semiáridas y contienen gran cantidad de minerales arcillosos.

De acuerdo (Leed D y Ian F, 2012) un suelo esencialmente expansivo es aquel que cambia de volumen en relación con los cambios en el contenido de agua, estos tipos de suelos presentan un potencial de expansión significativo y, además, también existe un potencial de contracción. Menciona que a mayor cantidad de minerales expansivos que contenga un suelo, mayor será su potencial de hinchamiento.

Entonces se puede decir, que un suelo expansivo presenta un cambio de volumen cuando existe una variación de su contenido de humedad lo cual produce un potencial de hinchamiento o un potencial de contracción, este potencial de hinchamiento o contracción aumentara cuando el suelo presente una mayor cantidad de minerales arcillosos expansivos ya que estos absorben agua y como resultado se tiene que el suelo se hincha cuando absorbe agua y se encoge cuando se seca.

Se puede inferir que los suelos expansivos que contienen mayor cantidad de minerales arcillosos pueden absorber mayores cantidades de agua volviéndose pegajosos y pesados, por el contrario, también se pueden volver duros cuando se secan y esto último puede provocar encogimiento y agrietamiento del suelo. La hinchazón y la contracción no son procesos generalmente reversibles (Holtz y Kovacs, 1981) ya que el suelo al agrietarse y se vuelve a humedecer las grietas no se cierran perfectamente y esto hace que el agua tenga una mayor facilidad de ingresar al suelo para el proceso de hinchamiento.

2.1.2. Estabilización de suelos

La Norma CE.020, suelos y taludes lo define como: “Proceso físico o químico, mediante el cual se mejora las condiciones mecánicas de un suelo”.

La estabilización de un suelo busca principalmente un aumento de su capacidad portante, así como una disminución de la sensibilidad frente al agua y otras condiciones medioambientales desfavorables. (ANCADE; ANTER; IECA, 2008)

Según Fratelli (1993) “Estabilizar un suelo es el resultado de la aplicación de procesos que alteran sus propiedades iniciales y mejoran su comportamiento desde el punto de vista resistente, incrementando o protegiendo sus características mecánicas, la estabilidad de volumen, la capacidad de drenaje, etc.”

En consecuencia, la finalidad de la estabilización de un suelo es mejorar sus propiedades mecánicas dado que esta sea capaz de no generar daños graves a las estructuras proyectadas, así como de ser capaz de soportar el peso de dichas estructuras.

Entre los tipos de suelos que requieren ser estabilizados se encuentran los siguientes:

- Suelos de relleno
- Suelos colapsables
- Suelos expansivos
- Suelos blandos
- Suelos con nivel freático superficial
- Suelos erosionables
- Las bases y sub-bases de pavimentos
- Los desechos industriales, escorias, cenizas, entre otros

2.2. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Existen distintos métodos para estabilizar un suelo de los cuales se mostrará un cuadro con las diferentes alternativas de estabilización:

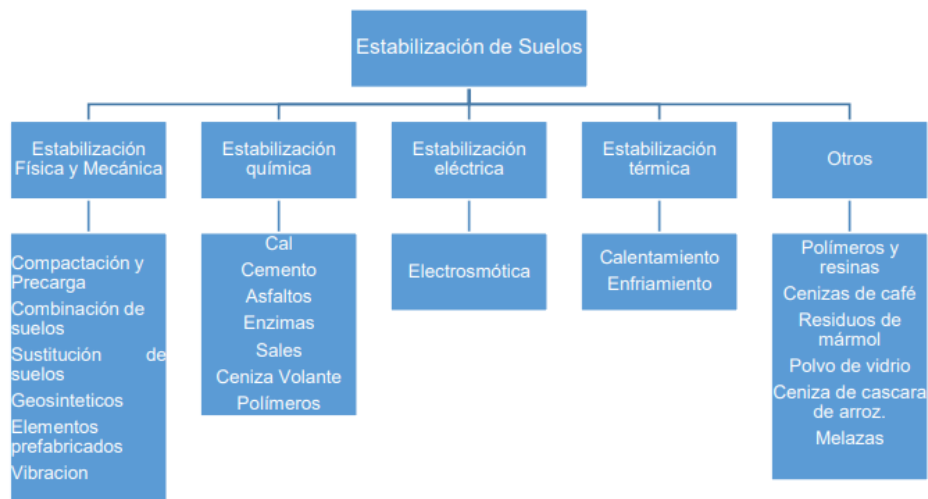


Figura N°1: Tipos de estabilización de suelos

Fuente: (Castro, 2017)

Tomando como referencia la Figura N°1 se procederá a describir los diferentes métodos de estabilización.

2.2.1. Estabilización física y mecánica

Este método es aplicado a través de cambios físicos sin producir reacciones químicas con la finalidad de mejorar la capacidad de soporte de resistencia de los suelos, entre los cuales tenemos:

a. Compactación

El objetivo de este método es el de mejorar la resistencia cortante del suelo y por consiguiente su capacidad de carga se incrementa. Otros de los factores que se mejoran al compactarse el suelo es la densificación del material ya que, al incrementar el valor de su peso específico, esto reduce los vacíos y así evitar los asentamientos en las estructuras.

El método de compactación es aplicado a rellenos artificiales los cuales son utilizados en obras de presas, diques, pavimentos, muelles, entre otros.

Según Fratelli (1993) en su libro “Suelos, Fundaciones y Muros”, describe diferentes técnicas o métodos para realizar el método de compactación los cuales son:

- El apisonado. - esta técnica solo alcanza a ser aplicado a las capas superiores y su uso se limita a densificar suelos arenosos o limos poco plásticos.
- Paso de rodillo. - para grandes extensiones de suelo esta técnica es muy

eficaz, económico y rápido. Su alcance puede llegar hasta los 8 m. de profundidad.

- Precarga. - Esta técnica es económica y rápida ya que consiste en la precompresión del suelo por sobrecarga, para lo cual se descarga sobre el terreno a mejorar, un volumen suficiente de tierra, piedras o escombros, etc. Una de las finalidades es eliminar los asentamientos que pueda producirse en el suelo.
- Vibro-compactación superficial con planchas. - Esta técnica es muy eficaz al densificar un suelo ya que su efecto es similar al de los rodillos y los mejores resultados se dan en suelos que tienen un porcentaje de humedad próximo o ligeramente superior al óptimo.
- Método Terra-Probe. - Consiste en utilizar vibradores que se hunden dentro de la masa de suelo hasta una cierta profundidad. El sistema consiste en un pistón de acero de una longitud entre 2-3 m. que se conecta en su extremo superior a un martinete o martillo vibrador, este tipo de método es especialmente aplicado en suelos arenosos secos o saturados.

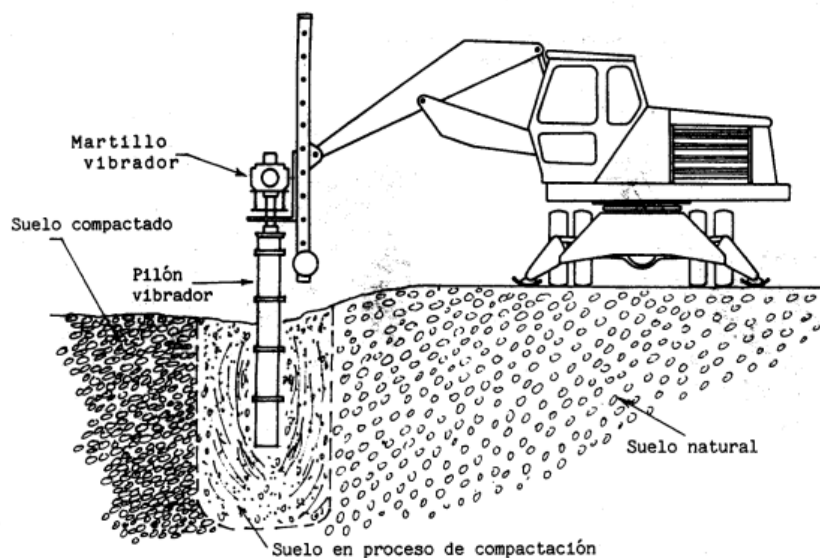


Figura N°2: Método Terra-Probe

Fuente: (Fratelli, 1993, p. 104)

- Vibro-reemplazo. - Consiste en una vibro compactación en profundidad del suelo, con posterior relleno del hueco con material grueso y finalmente este material se debe compactar.
- Vibro-flotación. - Es un proceso de densificación especialmente para arcillas

y limos blandos, se aplica en donde no se puede aplicar la técnica de vibro-compactación.

- Pilotes de compactación. - Estos pilotes pueden ser de arena o balastro con la finalidad de densificar el suelo.

b. Por reemplazo de suelos

Este método consiste en la sustitución de un estrato de suelo que no cumpla con los requisitos para ser usado como terreno de fundación por otro suelo que presente mejores características tanto físicas como mecánicas.

Según Castro (1992) menciona que este método es fácil y simple para losas y zapatas fundadas sobre suelos expansivos.

2.2.2. Estabilización química

Este método es aplicado al mezclar el suelo con un producto químico con la finalidad de modificar sus propiedades para mejorarlo. El producto químico usado no debe poner en riesgo el factor ambiental.

Según la norma CE.020, suelos y taludes, este método es aplicado en la estabilización de suelos en casos que:

- No cumpla con los requisitos mínimos de resistencia o deformación para sustentar obras de ingeniería civil
- No pueda ser empleado en condiciones naturales
- No pueda ser eliminado o reemplazado por otro

2.2.2.1. Estabilización con cal

Chen (1975) y Castro (1992) mencionan que el uso de la cal para estabilizar un suelo ya era utilizado desde hace muchísimos años, en China ya era utilizado como agente estabilizante en las cimentaciones sin embargo la Ingeniería moderna de ese entonces rechazó el uso de la cal (preferencia al uso del cemento) debido a que la acción cementante de la cal requiere mucho tiempo y además que la resistencia requerida era baja comparándola con la que se obtenía con el cemento. Si la resistencia no es requerimiento, la cal es un agente favorable para reducir el potencial de hinchamiento en la cimentación del suelo.

Al mezclar cal con suelos expansivos, estos generan reacciones químicas como son el intercambio catiónico, la floculación y aglomeración de partículas, transformando al suelo expansivo que es un suelo inestable a un material utilizable

modificando su resistencia, pero sobre todo los cambios volumétricos generados por este suelo que son la característica principal de los suelos expansivos. (Sanchez, 2014)

“La incorporación de la cal a un suelo arcilloso provoca tanto mejoras a corto plazo, que se producen entre algunos minutos y unas pocas horas, como un efecto de estabilización a largo plazo, que se prolonga durante varios meses e incluso algunos años.” (ANCADE; ANTER; IECA, 2008)

La cal es un producto que se compone de óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio, que proceden de la calcinación de minerales calizos y dolomíticos. Son utilizadas para estabilizar un suelo, se puede clasificar en diferentes criterios:

- Según la proporción de carbonatos magnésicos

Cales de alto contenido en calcio: Procedentes de material base de CaCO_3 , con no más del 5% de MgCO_3 .

Cales dolomíticas: Procedentes de material base de más del 5% de MgCO_3

- Según su proceso de obtención y materiales de origen

Cales Hidráulicas: Son obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (sílice y alumina) por su calcinación y posterior hidratación. Estos tienen propiedades hidráulicas ya que se endurecen con el agua.

Cales Aéreas: Se obtienen de rocas calizas con más del 95% de carbonatos y se endurecen en contacto con el CO_2 del aire.

- Según el tipo de presentación

Cal Viva: Este tipo de cal proviene directamente del proceso de calcinación y se presenta en granos o molidas en polvo.

Cal Apagada: Proviene de la hidratación de la cal viva y como tal es posible encontrarla en forma de pasta, lechada o suspensión de cal en agua, también se le puede encontrar en forma de polvo seco.

Forma	Ventajas	Desventajas
Cal viva (apagada)	- La proporción de óxido de calcio es mas alta para igual peso - Se puede usar para el secado del soporte o medio - Permite trabajar en más épocas del año - Ahorra costos de transporte - Al tener una mayor densidad aparente su almacenamiento es mas económico - Su aplicación es mas rápida que una lechada	- Es un material inestable para su almacenamiento - Su aplicación es peligrosa - Requiere normalmente la aplicación de agua posterior para su uso y para su
Cal apagada en polvo	- No presenta riesgos de aplicación - Su aplicación es más rápida que una lechada	- Requiere mas cantidad para proporcionar la misma actividad que la cal viva - Genera la emisión de polvo en la extensión
Cal apagada en lechada	- Sirve para humedecer el soporte o medio que lo recibe una vez que se aplique - Es más fácil asegurar una distribución homogénea	- Su transporte se encarece porque se mueve agua - Requiere incorporar medios especiales de almacenamiento y extensión

Tabla N°1: Ventajas y desventajas de las formas de presentación de la cal

Fuente: (Bauzá, s.f.)

Efectos de cal

Al aplicar la cal en un suelo arcilloso este origina una modificación en las propiedades físicas, si bien se produce distintos procesos ya sea por la mineralogía del suelo, el tipo forma de la cal u otros procesos. A continuación, se mencionan los efectos producidos mediante la aplicación de la cal:

- Reducción de la humedad natural del suelo. - Este efecto ocurre cuando la cal se aplica en forma de cal viva en polvo, ya que al producirse el apagado de la cal (también llamado hidratación), este reacciona evaporando el exceso de humedad que pueda tener un suelo. El principal inconveniente es que se produce una hidratación altamente exotérmica, la cual desprende grandes cantidades de calor que pueden afectar al personal que lo aplica sino cuenta con los implementos de seguridad adecuados.
- Modificación de la granulometría. - Este efecto en los suelos arcillosos no es apreciado directamente ya que la modificación de la granulometría se aprecia en las partículas de un tamaño inferior micras la cual puede ser detectado realizando ensayos de sedimentación.
- Aumento de la permeabilidad. - En este efecto se puede apreciar indirectamente la modificación de la granulometría ya que el añadirle cal este aumenta la permeabilidad sin embargo diversos autores mencionan

que el efecto a largo plazo se reduce incluso disminuye la permeabilidad inicial del suelo por ello también este efecto no suele ser un objetivo en la mezcla de suelo con cal.

- Mayor trabajabilidad. - A consecuencia del posible secado del suelo, de la reducción del volumen de partículas pequeñas, de la pérdida de fuerzas de unión entre partículas esto genera una mayor trabajabilidad de suelos arcillosos mezclados con cal, ya que el suelo mezclado cambia de tener un comportamiento cohesivo a uno más tipo granular es decir más arenoso.
- Reducción del índice de plasticidad. - Es el principal cambio que se manifiesta en la adición de cal al suelo arcilloso, ya que este afecta de manera directa al límite plástico del suelo lo cual genera que el índice de plasticidad se reduzca.

Según Bauzá (s.f.) menciona que la reducción del índice de plasticidad de suelo tiende a ser regresiva o asintótica llegando a un punto en el cual la cal no produce reducciones sustanciales.

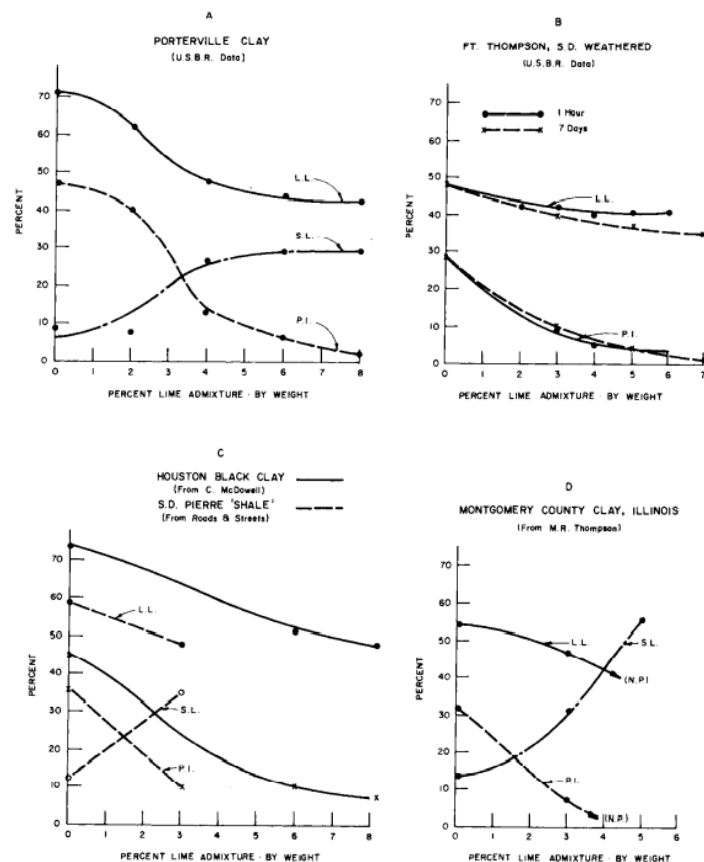


Figura N°3: Efecto de la cal en las propiedades plásticas del suelo

Fuente: (Chen, 1975, p. 172)

- Reducción del potencial cambios volumétricos. - La mezcla de cal con el suelo arcilloso afecta de manera drástica e inmediata en su potencial expansivo lo cual sirve para reducir el riesgo de hinchamiento y retracción del suelo. Este efecto se puede visualizar mediante los ensayos de expansión libre y controlada, también se puede visualizar en la etapa de expansión del ensayo CBR.
- Modificación de las características de compactación. - Las características de compactación es decir la máxima densidad seca (M.D.S.) y el óptimo contenido de humedad (O.C.H.) del suelo arcilloso son modificadas mediante la adición de cal lo cual produce que haya una reducción de la M.D.S. y un aumento del O.C.H.
- Aumento inmediato de la consistencia. - Este efecto se refiere al incremento de la capacidad portante del suelo y esta se basa en que hay una distribución de las partículas del suelo que permite una mayor redistribución de las tensiones ante sollicitaciones exteriores por ello la cal es usada en los proyectos de carreteras ya que aumenta su resistencia y este efecto se puede visualizar mediante el ensayo C.B.R.

2.2.2.2. Estabilización con cemento

Los cementos comúnmente utilizados para la estabilización son los cementos Portland, estos se obtienen por la molturación de su clinker, de adiciones activas, en su caso, y de la cantidad adecuada de un regulador de fraguado. El clinker es el resultado de calcinar mezclas de calizas y arcillas, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes. Los principales componentes del clinker son el silicato tricálcico (SC3), el silicato bicálcico (SC2), el aluminato tricálcico (AC3) y el ferritoaluminato tetracálcico (C4AF), a los que hay que añadir otros componentes secundarios. (ANCADE; ANTER; IECA, 2008)

Según la NTP 334.009 (2005) y NTP 339.082 (2000) los tipos de cemento son:

- Tipo I: Para uso general, que no requiera propiedades especiales de cualquier otro tipo.
- Tipo II: Para uso general, y específicamente cuando se desea moderada resistencia a los sulfatos o moderada calor de hidratación.
- Tipo III: Para ser utilizado cuando se requiere altas resistencias iniciales.
- Tipo IV: Para utilizarse cuando se desea bajo calor de hidratación

- Tipo V o HS: Para emplearse cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

Según Das (2012, p. 764) el cemento se puede usar para estabilizar suelos arenosos y arcillosos, ya que al igual que la cal este ayuda a disminuir el límite líquido y disminuye el índice de plasticidad. Estos son óptimos en suelos arcillosos con límite líquido es menor 45 o 50 y con un índice de plasticidad menor a 25.

La metodología que se usa para el mezclado y dispersión del cemento es similar al de la cal, pero a diferencia de este la dificultad se presenta al querer introducir el cemento con suelos de grano fino debido a que son menos solubles. (Chen, 1975)

Sin embargo, la Norma CE. 020 y ANCADE (2008) mencionan que para suelos arcillosos altamente plásticos con el fin de optimizar la adición de cemento previamente se debe añadir un porcentaje mínimo de cal de aproximadamente de 1 a 2%.

MATERIAL	TIPOS DE ESTABILIZACION			
	MECÁNICA	CON CEMENTO	CON CAL	CON EMULSIÓN
Grava	Puede ser necesaria la adición de finos para prevenir desprendimiento.	Probablemente no es necesaria, salvo si hay finos plásticos. Cantidad de 2 a 4%.	No es necesaria, salvo que los finos sean plásticos. Cantidad de 2 a 4%.	Apropiada si hay deficiencia de finos. Aproximadamente 3% de asfalto residual.
Arena limpia	Adición de gruesos para dar la estabilidad y de finos para prevenir desprendimientos.	Inadecuada: produce material quebradizo.	Inadecuada: no hay reacción.	Muy adecuada: De 3 a 5% de asfalto residual.
Arena arcillosa	Adición de gruesos para mejorar resistencia.	Recomendable 4 - 8%	Es factible dependiendo del contenido de arcilla.	Se puede emplear de 3 a 4% de asfalto residual.
Arcilla arenosa	Usualmente no es aconsejable	Recomendable 4 - 12%	4 a 8% dependiendo del contenido de arcilla.	Se puede emplear pero no es muy aconsejable.
Arcilla	Inadecuada	No es muy aconsejable. La mezcla puede favorecerse con un mezcla con 2% de cal y luego entre 8 y 15% de cemento.	Muy adecuada. Entre 4 y 8% dependiendo de la arcilla.	Inadecuada.

Figura N°4: Alternativas de estabilización de suelos

Fuente: (Norma CE.020 Suelos y Taludes, 2021)

El proceso de estabilización de un suelo con cemento consiste en realizar una mezcla de suelo adicionando un cemento Portland en el cual producirá un cambio

en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo, este debe estar previamente pulverizado para que dicha mezcla se endurezca con la hidratación del cemento.

Efectos del cemento

Al estabilizar o mezclar el suelo arcilloso con cemento, este produce cambios en sus propiedades. A continuación, se mencionan los efectos producidos mediante la aplicación de cemento (PCA).

- Reducción de la plasticidad. - Este efecto se produce cuando el suelo arcilloso cumple ciertos requisitos específicamente tiene que ser cuando el Limite Líquido $< 40\%$ y el índice de plasticidad $< 18\%$, caso contrario se recomienda agregar previamente una dosificación de cal ya que si el suelo arcilloso es de alta plasticidad se tendrá problemas en la trabajabilidad de la mezcla suelo-cemento tanto a nivel de ensayos y en campo.
- La reducción de la cantidad de partículas de tamaño de limo y arcilla. - La hidratación del cemento con el suelo produce unión entre las partículas lo cual forma granos de mayor tamaño y que se encuentra en el rango de partículas de arena fina. En consecuencia, el suelo tratado contiene menos partículas de limo y arcilla.
- El incremento del valor del índice CBR. - La adición de cemento al suelo tiene mayor relevancia en las pruebas de CBR ya que existe un incremento sustancial en la resistencia con una baja dosificación del cemento, lo cual proporcionaría una plataforma de trabajo estable para una sub-base en un diseño de un pavimento flexible.
- El incremento de la resistencia al corte. - La reacción cementante entre el cemento y arcilla ocurre en dos procesos, primario y secundario. El primario es el cual el cemento se hidrata y el secundario es la reacción de las partículas de arcilla con el hidróxido de calcio para formar mayor material cementante lo cual contribuya en la resistencia de la mezcla suelo-cemento.
- La disminución de las propiedades de cambios de volumen. - Una medida directa para medir esta propiedad es en la ejecución del ensayo CBR específicamente en la etapa de saturación lo cual según ensayos de laboratorio tiene una reducción sustancial en la expansión al añadir cemento al material arcilloso

CAPÍTULO III: ENSAYOS AL SUELO NATURAL

3.1. ORIGEN DE LA MUESTRA A ANALIZAR

3.1.1. Situación geográfica

El área de investigación se ubica en la ciudad de Talara, distrito de Pariñas, provincia de Talara, departamento de Piura.

La muestra ha sido tomada de la Urb. Sudamérica, el sector de muestreo se encuentra al pie del cerro al lado del I.E.P. Federico Villareal.

3.1.2. Ubicación

Se realizó la excavación de 2 calicatas

Calicata	Profundidad (m.)	Coordenadas		
		Zona	Este (m.)	Norte (m.)
C-1	1.50	17	470185	9492759
C-2	1.60	17	470184	9492779

Tabla N°2: Datos de exploración
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestran imágenes de las calicatas exploradas:



Figura N°5: Vista Frontal de la C-1.
Fuente: Elaboración Propia



Figura N°6: Vista de perfil de la C-1.
Se encontró material arcilloso
Fuente: Elaboración Propia



Figura N°7: Vista Frontal de la C-2.
Fuente: Elaboración Propia



Figura N°8: Vista de perfil de la C-2.
Se encontró material arcilloso
Fuente: Elaboración Propia



Figura N°9: Material tipo lutita extraído de las exploraciones
Fuente: Elaboración Propia

Con el objetivo de obtener información geotécnica del suelo, se realizó ensayos de laboratorio para poder determinar las propiedades físicas, expansivas y químicas de la muestra.

Los ensayos de Laboratorio fueron realizados en el laboratorio MARJENT ENGINEERING LAB S.A.C.

3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

3.2.1. Contenido de Humedad

Referencia: Norma ASTM D2216

Este ensayo se refiere al contenido de agua de un suelo que se determina a partir de la relación entre el peso del agua y el peso seco del suelo expresado en porcentaje. Para determinar dichos pesos se debe poner a secar la muestra de suelo en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ determinando así los pesos antes y después de haber ingresado al horno.

Resultados:

Muestra	Humedad (%)
Suelo Natural	9.50

Tabla N°3: Contenido de Humedad del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia

3.2.2. Análisis Granulométrico por Tamizado

Referencia: Norma ASTM D6913

Este ensayo determina cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas que constituyen al suelo, utilizando tamices de abertura cuadrada para determinar la gradación del suelo entre los tamices 3 pulgadas y N°200.

Con este ensayo se puede determinar el %grava que está comprendido entre los tamices 3" y N°4, %arena que está comprendido entre los tamices N°4 y N°200 y %finos que son las partículas que pasan el tamiz N°200.

Resultados:

Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	
2"	50.000	-	-	
1 1/2"	37.500	-	-	
1"	25.000	-	-	
3/4"	19.000	-	-	
1/2"	12.500	-	-	
3/8"	9.500	-	-	
1/4"	6.300	-	-	
N°4	4.750	-	-	
N°10	2.000	-	-	
N°20	0.850	-	-	100.0
N°30	0.600	0.1	0.1	99.9
N°40	0.425	0.1	0.1	99.9
N°60	0.250	0.2	0.3	99.7
N°100	0.150	0.2	0.5	99.5
N°140	0.106	0.2	0.8	99.2
N°200	0.075	0.7	1.5	98.5
FONDO		98.5		

% Grava	:	----
% Arena	:	1.5
% Finos	:	98.5

Tabla N°4: Granulometría por tamizado del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia

3.2.3. Análisis Granulométrico por Sedimentación

Referencia: Norma ASTM D7928

Este ensayo cubre la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de la porción de suelo de grano fino. El método de sedimentación o hidrómetro se usa para determinar la distribución del tamaño de partícula (gradación) del material que es más fino que el tamiz No. 200 (75 μ m) y mayor que aproximadamente de 0,2 μ m. El ensayo se realiza en material que pasa el tamiz No. 10 (2.0 mm) o más fino.

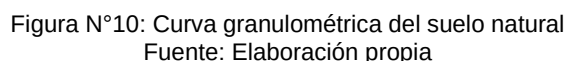
Este método se puede utilizar para evaluar la fracción de grano fino de un suelo con un amplio rango de tamaños de partículas al combinar los resultados de la sedimentación con un análisis de tamizado que da como resultado la curva de gradación completa.

Resultados:

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0262	81.13
0.0167	79.17
0.0099	72.84
0.0072	68.56
0.0052	64.31
0.0026	57.69
0.0011	45.23
0.0008	41.40

Grava	[N° 4 < f < 3"]	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm
Arena	[N° 200 < f < N° 4]	%	1.5	4.75 mm - 0.075 mm
Limo		%	46.4	0.075 mm - 0.002 mm
Arcilla		%	52.1	< 0.002 mm

Tabla N°5: Granulometría por sedimentación del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia



húmedo. La capa de tierra se seca lentamente hasta obtener una masa constante. El cambio de volumen del suelo, debido al secado, se determina mediante la técnica de inmersión en agua. Se utiliza una fina capa de cera para evitar la absorción de agua por parte de la capa de tierra seca durante la inmersión en el agua. Luego, se determina la pérdida de contenido de agua para secar el suelo hasta un volumen constante y se resta del contenido de agua inicial para calcular el límite de contracción. Los cambios en el volumen y la masa de la muestra se utilizan para calcular los factores de contracción del suelo.

Resultados:

Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Límite de Contracción (%)
Suelo Natural	66	28	10

Tabla N°6: Límites de Atterberg del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia

3.2.5. Gravedad Específica de Sólidos

Referencia: Norma ASTM D854

La gravedad específica de sólidos se define como la relación entre la masa de un volumen unitario de sólidos de un suelo y la masa del mismo volumen de agua a 20°C. Este ensayo consiste en determinar la masa de la fase sólida de un suelo y su respectivo volumen, la masa se determina con uso de una balanza y es necesario un procedimiento cuidadoso con uso del picnómetro para obtener el volumen de sólidos.

Resultados:

Muestra	Gravedad Específica de Sólidos (Gs)
Suelo Natural	2.67

Tabla N°7: Gravedad Específica de Sólidos del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia

3.2.6. Compactación Proctor Modificado

Referencia: Norma ASTM D1557

Este ensayo determina la relación entre el contenido de humedad de moldeo y la densidad seca de los suelos (curva de compactación) compactados en moldes de 4 o 6 pulgadas de diámetro luego de aplicarle impactos con un pisón

normalizado desde una altura de 18 pulgadas, que produce una energía de compactación de 56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³).

La compactación consiste en colocar el suelo en el molde de ensayo en 5 capas y aplicar en cada capa 25 o 56 golpes (dependiendo del método de ensayo) utilizando el pisón modificado, al finalizar la última capa se enrasa el suelo al volumen disponible del molde, se registra la masa y se determina la densidad del suelo compactado. El procedimiento se repite un mínimo de cuatro veces variando el contenido de humedad de la muestra.

Resultados:

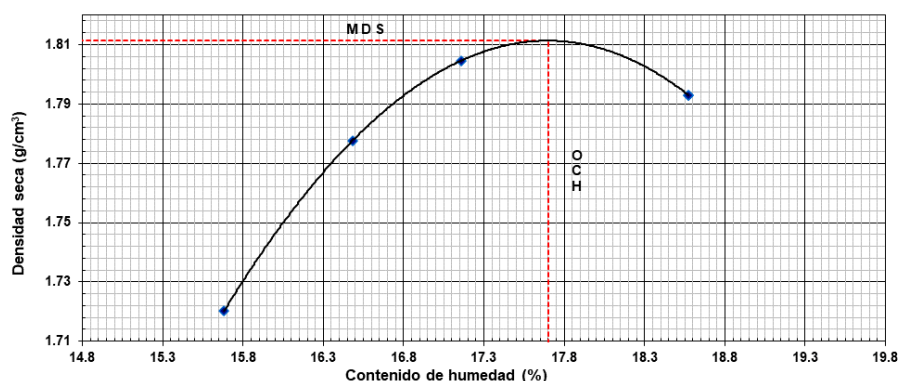


Figura N°11: Curva de compactación del suelo natural
Fuente: Elaboración propia

Muestra	Método	Máxima Densidad Seca (gr/cm3)	Óptimo Contenido de Humedad (%)
Suelo Natural	A	1.811	17.7

Tabla N°8: Datos de ensayo Proctor Modificado del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia

3.2.7. Compresión Simple no confinada

Referencia: Norma ASTM D2166

Este ensayo determina la resistencia a la compresión simple o compresión no confinada de un suelo cohesivo en condición intacta, remoldeada o reconstituida, mediante la aplicación de carga axial por deformación controlada.

El ensayo se aplica solo en muestras de suelos cohesivos. En esta prueba un espécimen cilíndrico de suelo sin confinamiento lateral se carga axialmente a una razón de deformación axial de 0.5 a 2 % por minuto y se miden las deformaciones axiales y cargas aplicadas en un tiempo transcurrido. La resistencia a la compresión no confinada que es el esfuerzo de compresión en la falla, y la

resistencia al corte es la mitad de la resistencia a la compresión no confinada.

Resultados:

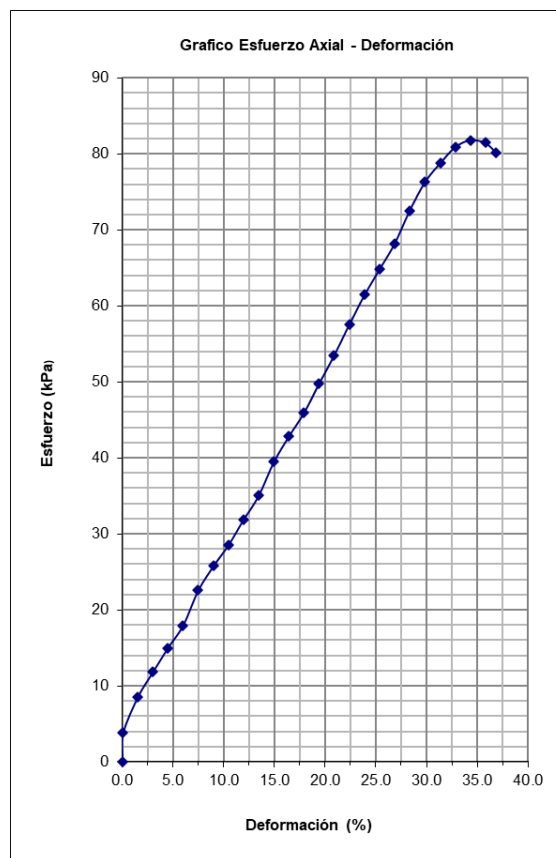


Figura N°12: Curva esfuerzo-deformación del suelo natural
Fuente: Elaboración propia

Muestra	qu (Kg/cm2)	Cohesión (Kg/cm2)
Suelo Natural	0.84	0.42

Tabla N°9: Datos de ensayo Compresión Simple no confinada del Suelo Natural
Fuente: Elaboración Propia

3.2.8. Expansión Libre y Controlada

Referencia: Norma ASTM D4546

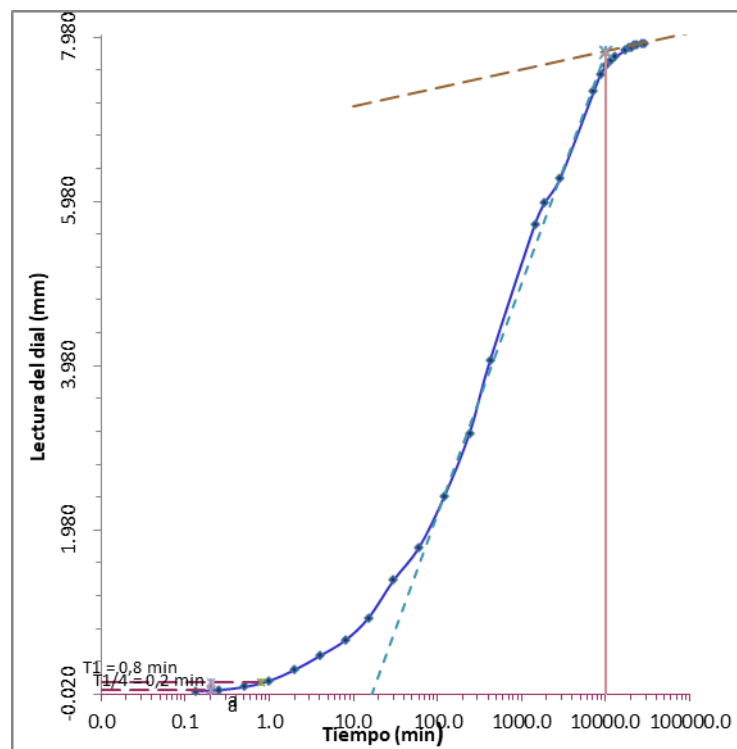
En esta prueba de expansión la muestra se coloca en un edómetro. Luego se le agrega agua al espécimen y se determina el aumento del volumen de la muestra, midiendo la altura con dial ya que la sección transversal es conocida, hasta que se alcance que las lecturas del dial se mantengan constante. El porcentaje de expansión libre se calcula a partir de la curva de expansión.

La Presión de Hinchamiento es aquella necesaria para un hinchamiento nulo. Este dato es muy importante cuando se requiere calcular el levantamiento. La

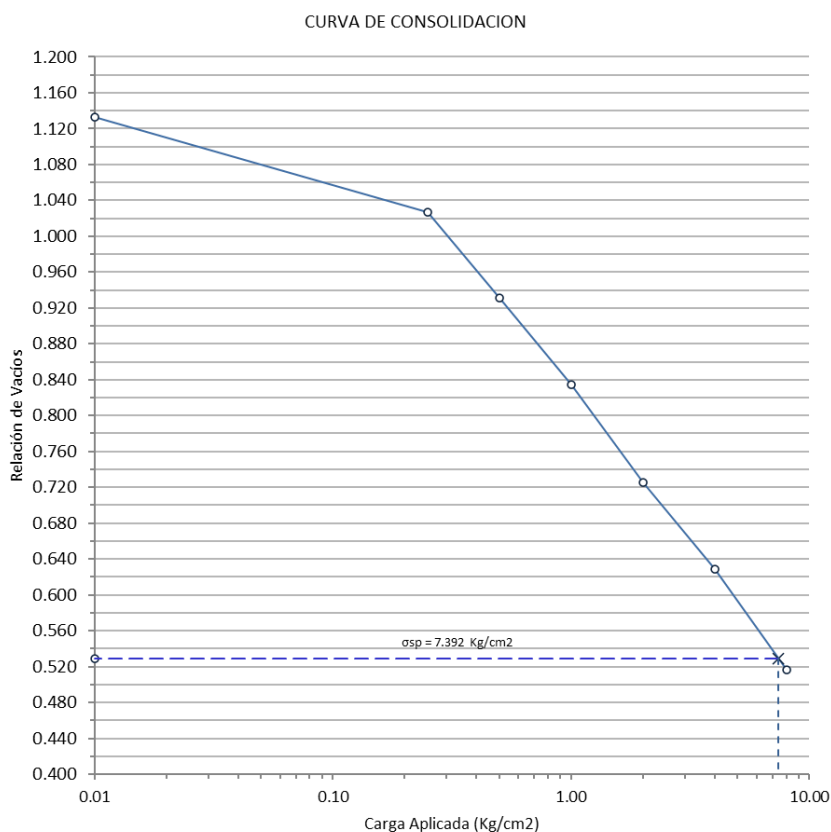
presión máxima que hay que aplicar para que no se produzca hinchamiento se conoce con el nombre de presión de hinchamiento. Aplicada la presión máxima, se van quitando cargas y se miden los hinchamientos que se producen. El hinchamiento bajo carga nula en este ensayo es siempre inferior al hinchamiento libre.

Resultados:

Se realizó el ensayo a la muestra de suelo natural en dos condiciones, inalterado y remoldeado al 97% de la M.D.S del ensayo Proctor modificado.



a)



b)

Figura N°13: Ensayo de expansión con carga controlada, a) Curva de expansión libre, b) etapa de consolidación
Fuente: Elaboración propia

Muestra	Estado	Densidad seca (gr/cm³)	Grado de Compactación (%)	Expansión (%)	Presión de hinchamiento (Kg/cm²)
Suelo Natural	Inalterado	2.020	-	58.5	14.97 (*)
Suelo Natural	Remoldeado	1.751	97	39.2	7.39

* El valor obtenido es erróneo debido a que el espécimen su estado inalterado se atascó en la etapa de consolidación provocando que sea necesario una mayor carga para controlar la expansión

Tabla N°10: Datos de ensayo Expansión del Suelo Natural

Fuente: Elaboración Propia

3.2.9. Difracción de Rayos X

Para determinar el contenido mineralógico del suelo se ha realizado el ensayo de difracción de rayos X (XRD). Este ensayo no destructivo consiste en caracterizar materiales cristalinos de muestras en polvo, sólidas y líquidas.

Resultados:

El ensayo ha sido realizado en la muestra natural en la empresa MINEMETALLURGY S.A.C., obteniendo los siguientes resultados.

Muestra Suelo Natural

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO_2	33.5
Moscovita (Sericita)	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	16.3
Cloritoide	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	12.3
Plagioclasas (Albita)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	7.6
Nontronita	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	7.3
Plagioclasas (Oligoclasa)	$(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$	5.9
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5.1
Tridimita	SiO_2	3.9
Clinopiroxeno (Diópsido)	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	3.8
Titanomagnetita	$\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$	1.4
Lautita	CuAsS	< L.D.
Silvita	KCl	< L.D.
Cuprita	Cu_2O	< L.D.
Anatasa	TiO_2	< L.D.
Granate (Grosularia)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	< L.D.

L.D: Limite Detección

Tabla N°11: Datos de ensayo de Difracción de rayos X
Fuente: MINEMETALLURGY S.A.C.

Según los resultados de difracción de rayos X los minerales predominantes en la muestra de suelo arcilloso son: 33.5% de Cuarzo, 16.3% de Moscovita (Sericita), 12.3% de Cloritoide, 7.6% de Plagioclasas (Albita), 7.3% de Nontronita, 5.9% de Plagioclasas (Oligoclasa) y 5.1% de Caolinita.

CAPÍTULO IV: ENSAYOS AL SUELO CON CAL

Para estabilizar un suelo con cal, según la bibliografía se recomienda utilizar cal viva o cal apagada, para el presente estudio se óptó por la cal viva (óxido de calcio) de la marca Molical. Se realizó los distintos ensayos para determinar sus propiedades físicas que se presentan a continuación:

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Gs
Cal viva	0.0	2.7	95.9	1.4	2.90

Tabla N°12: Datos de caracterización de Cal
Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a la mezcla de suelo con cal, luego se dejó reposar 1 hora como mínimo para que la cal reaccione con las partículas de suelo. Para determinar el porcentaje óptimo de cal en la muestra de suelo, previamente se definió dosificaciones a las que se realizaron ensayos de límites de atterberg a fin de determinar cómo se modifican las propiedades plásticas en función del porcentaje de cal añadido:

Cal (%)	LL	LP	IP
0	66	28	38
1	76	30	46
2	63	33	30
3	65	38	27
4	64	40	24
5	62	40	22
6	62	40	22
7	60	37	23
8	61	39	22

Tabla N°13: Datos de límites en función del porcentaje de cal
Fuente: Elaboración Propia

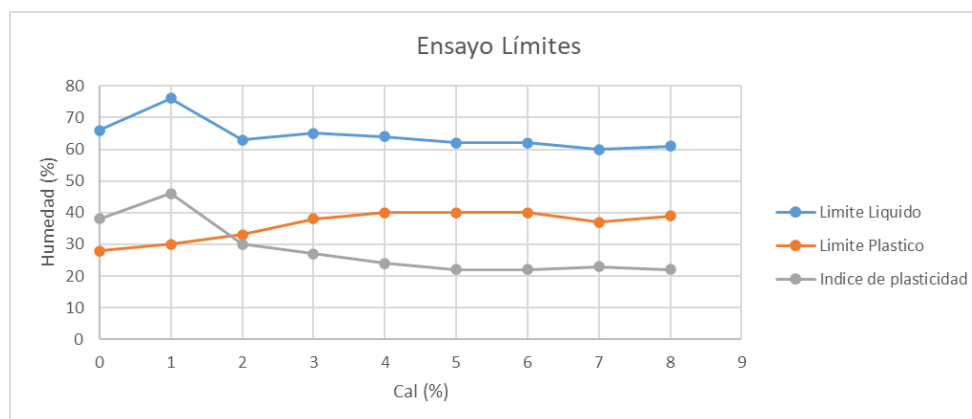


Figura N°14: Curva de ensayos de límites del suelo en función de la variación del porcentaje de cal añadido
Fuente: Elaboración propia

Según la tendencia del índice de plasticidad se observó que se mantiene constante a partir de un 5% de cal añadida, por ende, se realizó ensayos para dosificaciones de 4%, 5% y 7% de cal.

4.1. DOSIFICACIONES 4%, 5% Y 7% DE CAL

A continuación, se presentará los resultados de ensayos realizados a la muestra de suelo mezclado con cal que determinan cómo se modifican las características físicas del material en función de la cal añadida.

4.1.1. Análisis Granulométrico por Sedimentación

Se presenta la variación en el %limos y % arcillas de la muestra con adición de cal de 4%, 5% y 7%.

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Suelo natural	0.0	1.5	46.4	52.1
Suelo + 4% cal	0.0	1.5	47.8	50.7
Suelo + 5% cal	0.0	2.4	55.7	41.9
Suelo + 7% cal	0.0	4.4	55.1	40.5

Tabla N°14: Granulometría del suelo con 4%, 5% y 7% de cal
Fuente: Elaboración Propia

Se observó que el porcentaje de arena y limo aumentan a medida que aumenta el porcentaje de cal, eso se atribuye básicamente a que la cal al ser un material cementante reacciona con el agua que contiene el suelo uniando las partículas finas, logrando formar partículas de mayor tamaño.

4.1.2. Límites de Consistencia

Se presenta la variación de los valores de Limite Liquido (LL), Limite Plástico (LP), Índice de Plasticidad (IP) y Limite de contracción (LC) en función de las dosificaciones de cal de 4%, 5% y 7%.

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)
Suelo natural	66	28	38	10
Suelo + 4% cal	64	40	24	19
Suelo + 5% cal	62	40	22	20
Suelo + 7% cal	60	37	23	21

Tabla N°15: Limites de Atterberg del suelo con 4%, 5% y 7% de cal
Fuente: Elaboración Propia

Se observó que el límite liquido disminuye a medida que aumenta el porcentaje de

cal. El límite plástico aumenta hasta un 5% de cal, para luego disminuir ligeramente. El índice de plasticidad disminuye a medida que el porcentaje de cal aumenta. El límite de contracción por el contrario aumenta considerablemente a medida que aumenta el porcentaje de cal.

4.1.3. Proctor Modificado

Se determinó la variación de la Máxima Densidad Seca (MDS) y el Óptimo Contenido de Humedad (OCH) en función de las dosificaciones de 4%, 5% y 7% de cal.

Muestra	Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	Óptimo Contenido de Humedad (%)
Suelo natural	1.811	17.7
Suelo + 4% cal	1.731	19.2
Suelo + 5% cal	1.691	20.8
Suelo + 7% cal	1.687	21.2

Tabla N°16: M.D.S. y O.C.H. del suelo con 4%, 5% y 7% de cal
Fuente: Elaboración Propia

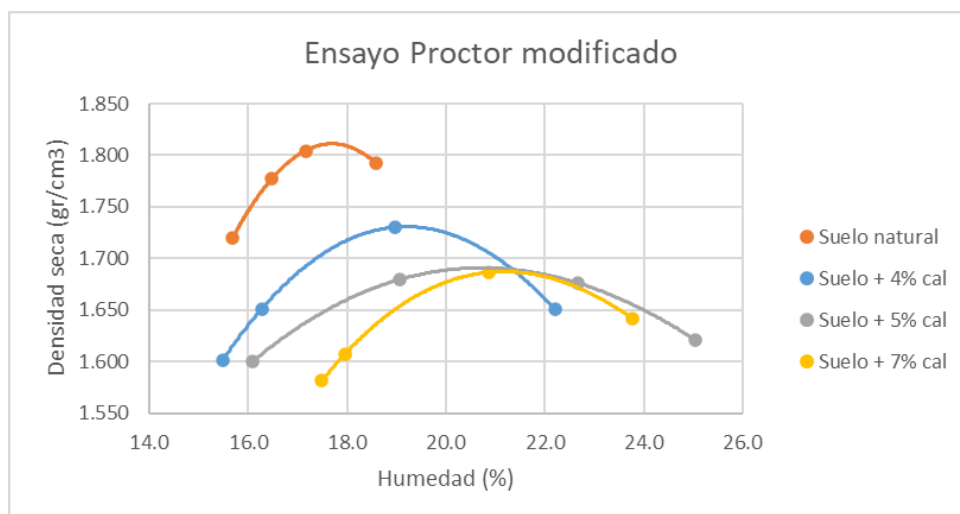


Figura N°15: Curva de ensayo Proctor modificado con 4%, 5% y 7% de cal
Fuente: Elaboración propia

Se observó que, al aumentar el porcentaje de cal, la máxima densidad seca disminuye y el óptimo contenido de humedad aumenta, esto se debe a que la cal normalmente es usada para reducir la humedad del suelo arcilloso y por ende al ser mezclado con la arcilla este aumenta el óptimo contenido de humedad, además al reaccionar entrelaza los granos del suelo logrando formar partículas de mayor tamaño, generando mayores vacíos entre partículas que hace que la máxima densidad seca disminuya.

4.1.4. Expansión Libre

Para evaluar la expansión libre de las muestras de suelo con cal, previamente se preparó muestras mediante el ensayo de Proctor modificado procurando obtener la máxima densidad posible, siendo esta la condición inicial a ser comparada.

Las muestras fueron compactadas al 95% de la M.D.S. en el ensayo Proctor Modificado. El procedimiento para la obtención de especímenes compactados fue el siguiente:

- Se prepararon muestras compactadas de suelo + cal en el molde del Proctor al 95% de su M.D.S.

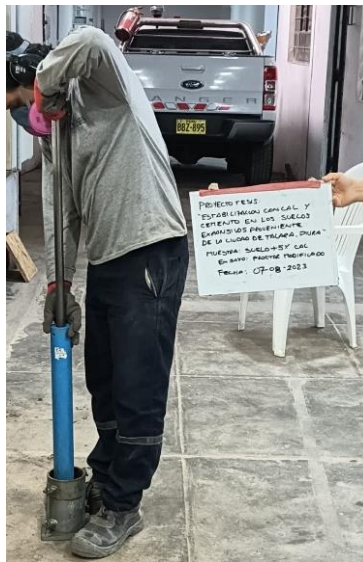


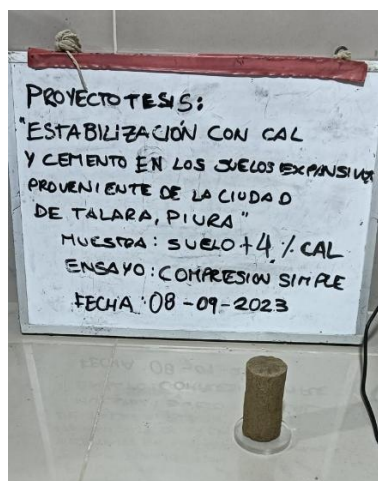
Figura N°16: Remoldeo de espécimen
Fuente: Elaboración propia

- Luego de compactar se dejó reposar las muestras compactadas por 3 días al aire libre, esto con el fin de que la cal reaccione con el agua y el suelo
- Una vez pasado los 3 días se procedió a sumergir en un recipiente con agua el molde con la muestra compactada durante 7 días (tiempo de fraguado de la cal viva). Antes de sumergir el molde con la muestra se midió la altura entre el anillo del molde y la cara superior de la muestra.
- Luego de 7 días, se retiró el molde del recipiente con agua y se procedió a medir la altura final entre el anillo del molde y la cara superior de la muestra.
- Finalmente, se extrajo la muestra del molde y se tallo especímenes para los ensayos de expansión y compresión simple.

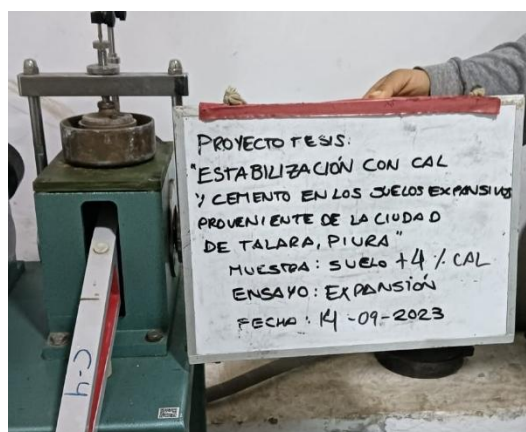


Figura N°17: Extracción de mezcla luego de 7 días sumergido en agua
Fuente: Elaboración propia

- Para el ensayo de expansión, el espécimen tallado se dejó secar al aire libre con la finalidad que se reduzca la humedad hasta un aproximado de 10%.



a)



b)

Figura N°18: Especímenes tallados de la muestra extraída, a) compresión simple, b) expansión libre
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta los resultados del ensayo de expansión libre con las dosificaciones de 4%, 5% y 7% de cal:

Muestra	Densidad seca (gr/cm ³)	Expansión Libre (%)	Grado de Compactación (%)	Reducción de expansión (%)
Suelo	1.751	39.2	97	
Suelo + 4% cal	1.710	16.5	99	57.9
Suelo + 5% cal	1.659	13.6	98	65.3
Suelo + 7% cal	1.645	12.4	98	68.3

Tabla N°17: Expansión libre del suelo con 4%, 5% y 7% de cal
Fuente: Elaboración Propia

Se observo que, al añadir cal al suelo arcilloso, este reduce su porcentaje de expansión libre; con 4% de cal la expansión se reduce en un 57.9%, con 5% de cal se reduce en un 65.3% y con 7% de cal se reduce en un 68.3%. En el grafico mostrado se observa que entre el 5% y 7% de cal, la variación de la expansión libre es mínimo.

4.1.5. Compresión Simple no confinada

La cal al ser un material cementante que se hidrata al contacto con el agua, cuando es mezclado con el suelo arcilloso este aumenta su resistencia. Esta resistencia se determinó con el ensayo de compresión simple no confinada para las dosificaciones de 4%, 5% y 7% de cal. Los especímenes a ser ensayados fueron obtenidos del molde del Proctor modificado del procedimiento que se siguió en el ensayo de expansión libre.

A continuación, se presenta los resultados de ensayo de compresión simple no confinada:

Muestra	Densidad seca (gr/cm3)	Cohesión (kg/cm2)
Suelo	1.370	0.4
Suelo + 4% cal	1.705	2.3
Suelo + 5% cal	1.653	2.8
Suelo + 7% cal	1.64	3.5

Tabla N°18: Compresión Simple no confinada del suelo con 4%, 5% y 7% de cal
Fuente: Elaboración Propia

Se observo que la resistencia de la mezcla aumenta a medida que aumenta el porcentaje de cal.

CAPÍTULO V: ENSAYOS AL SUELO CON CEMENTO

El tipo de cemento a utilizar se determinó mediante los ensayos de sales y sulfatos al suelo. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de ingeniería. A continuación, se presenta los resultados de dichos ensayos:

Muestra	Contenido de Sulfatos (p.p.m.)	Sales Solubles Totales (p.p.m.)	pH (%)
Suelo Natural	4286	6682	6.88

Tabla N°19: Ensayos químicos del suelo
Fuente: Laboratorio Químico-FIC-UNI

Según los resultados de la Tabla N°19 el suelo tiene un alto contenido de sulfatos por lo cual ocasiona un ataque químico severo al cemento, según las recomendaciones del ACI (comité 319-83) que se indica en la Tabla N°20

Presencia en el Suelo de:	p.p.m	Grado de Alteración	Descripción
SULFATOS	0 - 1000	Leve	Ocasiona un ataque químico al concreto
	1000 - 2000	Moderado	
	2000 - 20000	Severo	
	> 20000	Muy severo	
CLORUROS	> 6000	Perjudicial	Ocasiona problemas de corrosión de armaduras o elementos metálicos
SALES SOLUBLES TOTALES	>15000	Perjudicial	Ocasiona problemas de pérdida de resistencia mecánica por problemas de lixiviación

Tabla N°20: Elementos químicos nocivos al concreto
Fuente: ACI

Para mitigar el ataque químico por sulfato es recomendable utilizar cemento portland Tipo V o HS, los cuales tienen una alta resistencia a los sulfatos. Para la mezcla suelo-cemento del presente estudio se utilizó cemento andino HS.

Según la norma CE.020 en suelo arcilloso no es recomendable mezclar directamente con el cemento portland, es recomendable mezclar previamente el suelo con 1% o 2% de cal. Por consiguiente se procedió a realizar los ensayos de límites de atterberg a la mezcla de suelo-cemento en distintas dosificaciones así como también a la mezcla suelo-cemento con un 2% de cal añadido para luego de obtener los resultados, analizar la influencia del cemento en las propiedades plásticas del suelo.

A continuación, se muestra los resultados de los ensayos de límites de atterberg en dos condiciones:

- Mezcla suelo-cemento

Cemento (%)	LL	LP	IP
0	68	28	40
1	68	33	35
2	74	33	42
3	80	35	45
4	82	35	47
5	80	36	44
6	78	37	41
7	77	35	42
8	77	38	39

Tabla N°21: Datos de límites en función del porcentaje de cemento
Fuente: Elaboración Propia

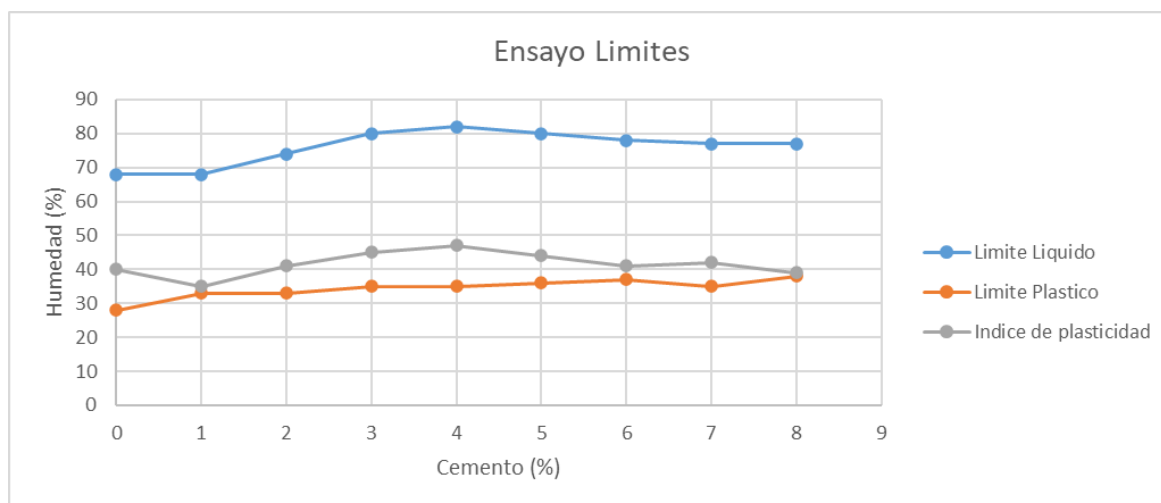


Figura N°19: Curva de ensayos de límites del suelo en función de la variación del porcentaje de cemento añadido
Fuente: Elaboración propia

- Mezcla suelo-cal-cemento

Previo a la inclusión del cemento en la mezcla suelo-cal-cemento, se mezcló el suelo con un 2% de cal y se dejó reaccionar durante 1 hora.

cal 2% + Cemento (%)	LL	LP	IP
0	66	28	38
1	62	37	25
2	62	39	23
3	61	38	23
4	59	40	19
5	61	41	20
6	58	37	21
7	58	38	20
8	59	39	20

9	56	34	22
10	55	37	18

Tabla N°22: Datos de límites en función del porcentaje de 2%cal + cemento
Fuente: Elaboración Propia

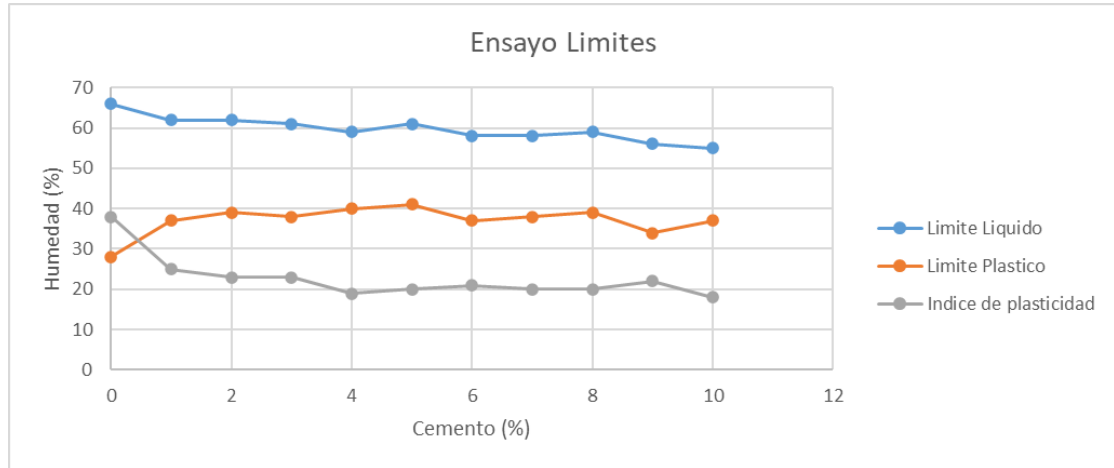


Figura N°20: Curva de ensayos de límites del suelo en función de la variación del porcentaje 2%cal+cemento añadido
Fuente: Elaboración propia

Se observó en la Figura N°19 de la mezcla suelo-cemento, el índice de plasticidad aumenta hasta un 4% de cemento y luego disminuye, el límite plástico tiende a aumentar. En la Figura N°20 en la mezcla suelo-cal-cemento el índice de plasticidad tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de cemento, el límite plástico tiende a tener un mayor aumento que la mezcla suelo-cemento. Por ende, se procedió a trabajar con la mezcla suelo-cal-cemento debido a que tiene una mayor influencia en la disminución de las propiedades plásticas del suelo arcilloso a diferencia de la mezcla suelo-cemento. Se observó al realizar los ensayos de límites de la mezcla suelo-cemento que este tiene una baja trabajabilidad.

Para el presente estudio, según los resultados obtenidos en los ensayos realizados y la recomendación de la norma se optó por añadir a la mezcla suelo-cemento el %Óptimo de cal, igual a 5.5%, el mismo que se indica en el capítulo VI; así también por cuestiones prácticas y económicas se considera la inclusión de 1% y 2% de cemento en la mezcla.

5.1. DOSIFICACIONES 1% Y 2% DE CEMENTO + %OPTIMO CAL

Se presenta los resultados de los ensayos realizados al suelo mezclado con las dosificaciones de cemento y el %óptimo de cal que determina cómo se modifican las características físicas del suelo en función del cemento añadido.

5.1.1. Análisis Granulométrico por Sedimentación

Se presenta la variación del %limos y %arcillas de la muestra con adición del %Óptimo de cal y del cemento.

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
Suelo	0.0	1.5	46.4	52.1
Suelo + %Óptimo cal + 1% cemento	0.0	1.5	47.0	51.5
Suelo + %Óptimo cal + 2% cemento	0.0	1.3	63.6	35.1

Tabla N°23: Granulometría del suelo con 1% y 2% de cemento
Fuente: Elaboración Propia

Se observó que el porcentaje de limo aumenta a medida que aumenta el porcentaje de cemento, reduciendo en gran parte el %arcilla, esto se debe a que el cemento al reaccionar con el agua forma partículas de mayor tamaño.

5.1.2. Límites de Consistencia

Se presenta la variación de los valores de Limite Liquido (LL), Limite Plástico (LP), Índice de Plasticidad (IP) y Limite de contracción (LC) para la combinación de suelo y el %Óptimo de cal mezclado con dosificaciones de cemento de 1% y 2%.

Muestra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)
Suelo	66	28	38	10
Suelo + %Óptimo cal + 1% cemento	58	37	21	24
Suelo + %Óptimo cal + 2% cemento	58	37	21	31

Tabla N°24: Límites de Atterberg del suelo con 1% y 2% de cemento
Fuente: Elaboración Propia

Se observó que el límite líquido disminuye y el límite plástico aumenta a medida que aumenta el porcentaje de cemento. El índice de plasticidad disminuye en gran proporción a medida que aumenta el porcentaje de cemento. El límite de contracción por el contrario aumenta considerablemente a medida que se aumenta el porcentaje de cemento.

5.1.3. Proctor Modificado

Se determinó la variación de la Máxima Densidad Seca (MDS) y el Óptimo Contenido de Humedad (OCH).

Muestra	Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	Óptimo Contenido de Humedad (%)
Suelo	1.811	17.7
Suelo + %Óptimo cal + 1% cemento	1.690	21.2
Suelo + %Óptimo cal + 2% cemento	1.646	23.0

Tabla N°25: M.D.S. y O.C.H. del suelo con 1% y 2% de cemento
Fuente: Elaboración Propia

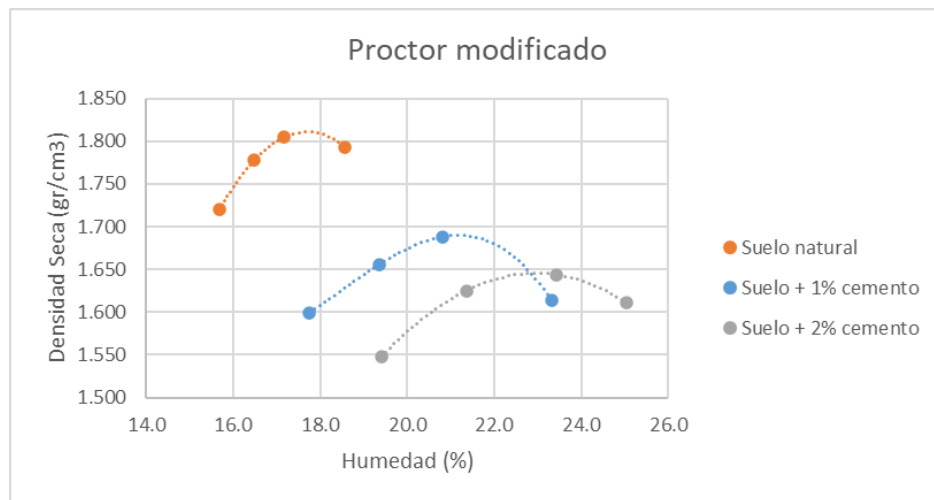
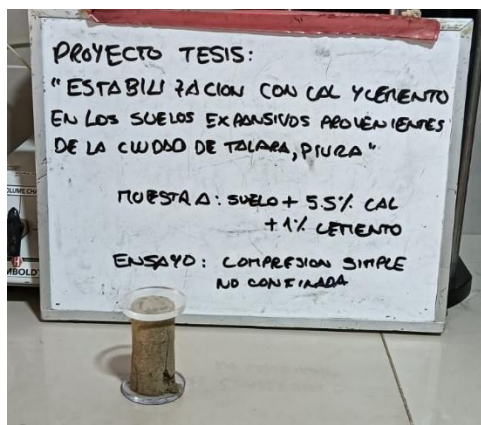


Figura N°21: Curva de ensayo Proctor modificado con 1% y 2% de cemento
Fuente: Elaboración propia

Se observó que al aumentar el %cemento, la máxima densidad seca disminuye y el óptimo contenido de humedad aumenta, esto es debido que el cemento necesita de mayor cantidad de agua para hidratarse y que al reaccionar entrelaza granos del suelo formando partículas de mayor tamaño, generando mayores vacíos entre partículas y por consecuencia la máxima densidad seca disminuya.

5.1.4. Expansión Libre

Para evaluar la expansión libre de las muestras de suelo con cemento y %óptimo de cal, las muestras fueron compactadas a partir del ensayo Proctor modificado siguiendo el mismo procedimiento de compactar al 95% de la M.D.S. en el molde del Proctor, luego la muestra compactada en el molde se dejó reposar al aire libre por 3 días para posteriormente sumergir el molde con la muestra en un recipiente con agua durante 7 días, finalmente se extrajo la muestra compactada del molde del Proctor y se talló un espécimen para ensayo de expansión y un espécimen para ensayo de compresión simple. En el numeral 4.1.4 se detalló el procedimiento para la obtención de estos especímenes.



a)



b)

Figura N°22: Especímenes tallados de la muestra extraída, a) compresión simple, b) expansión libre
Fuente: Propia

A continuación, se presenta los resultados del ensayo de expansión libre de la combinación del suelo con el %Óptimo de cal mezclado con las dosificaciones de 1% y 2% de cemento:

Muestra	Densidad seca (gr/cm ³)	Expansión Libre (%)	Grado de Compactación (%)	reducción de expansión (%)
Suelo	1.751	39.2	97	
Suelo + %Óptimo cal + 1% cemento	1.681	8.6	99	78.1
Suelo + %Óptimo cal + 2% cemento	1.678	4.1	102	89.5

Tabla N°26: Expansión libre del suelo con 1% y 2% de cemento
Fuente: Elaboración Propia

Se observo que al añadir cemento al suelo arcilloso, este reduce su porcentaje de expansión libre, con 1% de cemento la expansión se reduce en un 78.1% y con 2% de cemento se reduce en un 89.5%.

5.1.5. Compresión Simple no confinada

El cemento al contacto con el agua se endurece, por eso cuando es mezclado con el suelo arcilloso aumenta su resistencia. Esta resistencia será determinada con el ensayo de compresión simple no confinada. Los especímenes a ser ensayados fueron obtenidos del molde del Proctor modificado del procedimiento que se siguió en el ensayo de expansión libre.

A continuación, se presenta los resultados de ensayo de compresión simple no confinada:

Muestra	Densidad seca (gr/cm ³)	Cohesión (kg/cm ²)
Suelo	1.370	0.4
Suelo + %Optimo cal + 1% cemento	1.686	6.2
Suelo + %Optimo cal + 2% cemento	1.675	9.7

Tabla N°27: Compresión Simple no confinada del suelo con 1% y 2% de cemento
Fuente: Elaboración Propia

Se observo que la resistencia de la mezcla suelo-cemento aumenta al incrementar el porcentaje de cemento añadido.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. CLASIFICACIÓN SUCS Y AASHTO

De los resultados obtenidos en los ensayos al suelo natural se clasifico el suelo según el sistema S.U.C.S. (ASTM D2487) y el sistema AASHTO.

Muestra	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	IC (%)	S.U.C.S.	AASHTO
Suelo natural	0.0	1.5	98.5	46.4	52.1	66	28	38	10	56	CH	A-7-6 (23)

Tabla N°28: Propiedades de límites y granulometría del suelo natural
Fuente: Elaboración Propia

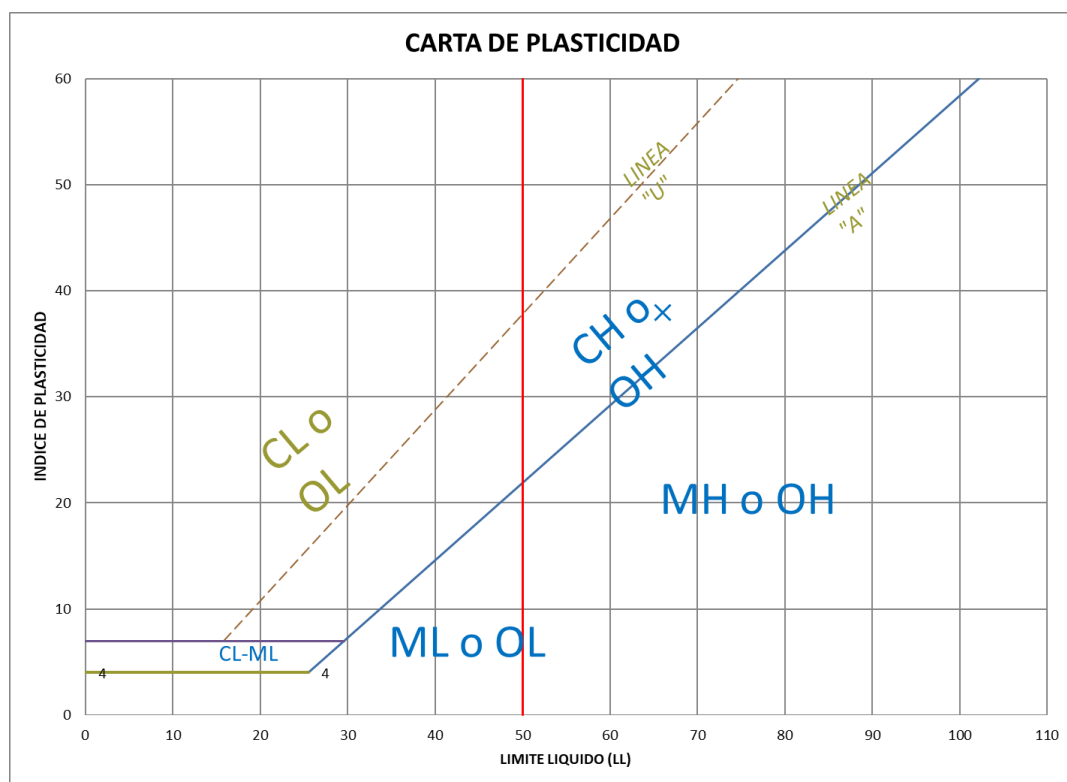


Figura N°23: Ubicación de Límite Líquido e Índice de Plasticidad en la carta de plasticidad
Fuente: Carta de Casagrande

Se determinó que el suelo natural de acuerdo a la clasificación SUCS es una arcilla de alta de plasticidad (CH) y la clasificación AASHTO es A-7-6 (23).

6.2. RECONOCIMIENTO DEL SUELO EXPANSIVO

A continuación, se procedió a clasificar el potencial expansivo del suelo mediante tres métodos los cuales son:

- Identificación Mineralógica
- Métodos Indirectos

- Métodos directos

6.2.1. Identificación Mineralógica

Según los resultados del ensayo de difracción de rayos X expuestos el numeral 3.2.9, el suelo natural de la zona de estudio contiene los siguientes minerales: 33.5% de Cuarzo, 16.3% de Moscovita (Sericita), 12.3% de Cloritoide, 7.6% de Plagiocasas (Albita), 7.3% de Nontronita, 5.9% de Plagiocasas (Oligoclasa) y 5.1% de Caolinita. No se identificó el mineral arcilloso esmectita, el cual es un mineral que tiende a sufrir cambios volumétricos altos al contacto con el agua.

6.2.2. Método Indirecto

A través de las propiedades físicas del suelo tales como: límites de atterberg, contracción lineal, método de clasificación y método de actividad se puede identificar el potencial expansivo del suelo. A continuación, se describen cada uno de ellos:

- Límites de Atterberg

Según Seed et al. (1962) relaciona el índice de plasticidad con el potencial de hinchamiento, según la siguiente tabla:

Índice de Plasticidad	Potencial de Hinchamiento
0 - 15	Bajo
10 - 35	Medio
20 - 55	Alto
35 o más	Muy alto

Tabla N°29: Relación Índice Plástico y Potencial de Hinchamiento
Fuente: (Seed et al., 1962)

El suelo natural tiene un IP (%) = 38, según la Tabla N°29, su potencial de hinchamiento es Muy alto.

- Contracción lineal

Según Altmeyer (1955) relaciona el límite de contracción con el potencial expansivo, según la siguiente tabla:

Límite de Contracción	Contracción Lineal	Grado de Expansión
< 10	> 8	Crítico
10 - 12	5 - 8	Marginal
> 12	0 - 5	No Crítico

Tabla N°30: Relación límite de contracción y Grado de Expansión
Fuente: (Altmeyer, 1955)

Índice plástico		Límite de Contracción	Probabilidad de Cambios de Volumen al producirse cambios de humedad
Regiones áridas	Regiones húmedas		
0 - 15	0 - 30	12 o más	Pequeña
15 - 30	30 - 50	0 - 12	Pequeña a Moderada
30 o más	50 o más	10 o menos	Moderada a Severa

Tabla N°31: Relación límite de contracción, índice plástico y Probabilidad de cambio de volumen
Fuente: (Altmeyer, 1955)

El suelo natural tiene un LC (%) = 10 y Contracción Lineal = 22.1 según la Tabla N°30, su potencial expansivo es Crítico y según la Tabla N°31 la probabilidad de Cambios de Volumen al producirse cambios de humedad es de Moderada a Severa.

También según Ranganatham y Satyanarayana (1965) relaciona el índice de contracción con el potencial de hinchamiento.

Índice de Contracción IC = LL - LC	Potencial de hinchamiento
0 - 20	Bajo
20 - 30	Medio
30 - 60	Alto
> 60	Muy Alto

Tabla N°32: Relación índice de contracción y Potencial de hinchamiento
Fuente: (Ranganatham y Satyanarayana, 1965)

El suelo natural tiene un IC (%) = 56, según la Tabla N°32, el potencial de hinchamiento es Alto.

- Método de Clasificación

Según Holtz y Gibbs (1956) relaciona el contenido de coloides, índice de plasticidad y límite de contracción con el potencial expansivo, según la siguiente tabla:

Datos de los ensayos índices*			Probable Expansión	Grado de Expansión
% Contenido Coloidal < 0.001 mm	Índice de Plasticidad	Límite de contracción	% Total de cambio de volumen	
> 28	> 35	< 11	> 30	Muy alto
20 - 13	25 - 41	7 - 12	20 - 30	Alto
13 - 23	15 - 28	10 - 16	10 - 30	Medio
> 15	< 18	> 15	< 10	Bajo

* Basado en sobrecargas verticales de 1.0 Lib/pulg²

Tabla N°33: Relación índice de plasticidad, límite de contracción y Probabilidad de cambio de volumen
Fuente: (Holtz y Gibbs, 1956)

El suelo natural tiene un %Coloides = 44.0% y IP (%) = 38 y LC (%) = 10 según la Tabla N°33, su %Total de cambio de volumen es mayor a 30 y su grado de expansión es Muy alto.

- Método de Actividad

Según Skempton (1953) propone que la actividad de las arcillas está definida por la siguiente formula:

$$A = \frac{IP}{\%particulas < 2\mu m}$$

Y según Seed et al. (1962) el cual propone este método, menciona que la actividad de las arcillas este definida por la siguiente formula:

$$A = \frac{IP}{C - 10}$$

Donde:

A: Actividad, IP: Índice de Plasticidad, C: %finos < 2μm.

A continuación, se calcula la actividad según los autores mencionados:

$A_{(Skempton)}=0.73$ y $A_{(Seed et al.)}=0.90$.

Según Skempton (1953) si la actividad es menor a 0.75, entonces hay inactividad de las arcillas además que según el valor calculado dicha actividad corresponde al mineral de la illita.

La clasificación para un suelo expansivo según Seed et al. (1962) será mostrado en la siguiente figura:

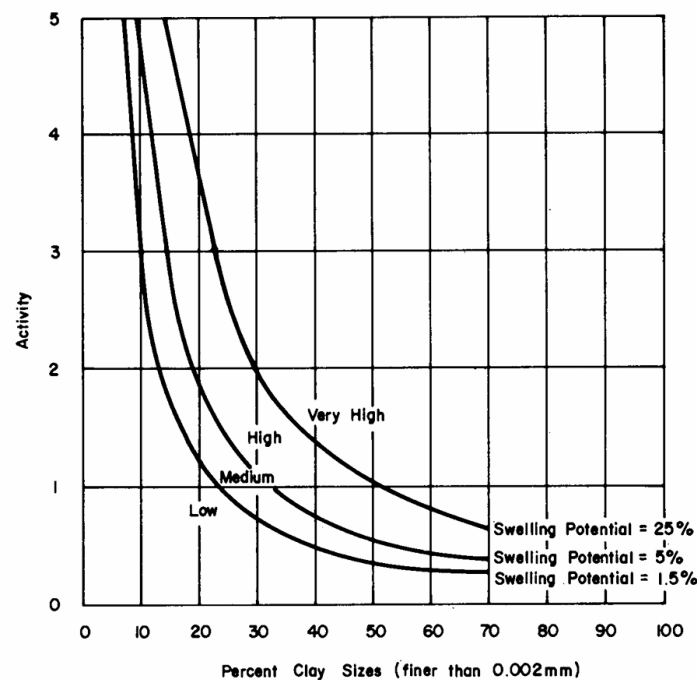


Figura N°24: Clasificación del potencial expansivo del suelo
Fuente: (Seed et al., 1962)

El suelo natural tiene una $A=0.90$ y $\% \text{finos} < 2\mu\text{m} = 52.1$ y según la figura N°24, el potencial expansivo es Muy alto.

6.2.3. Método Directo

Este método consiste en la determinación del %expansión del suelo el cual es determinado de los resultados del ensayo de expansión libre según la norma ASTM D4546. Este método de ensayos considera distintas variables las cuales son:

- La condición de la muestra, es decir, si es inalterado o remoldeado
- El contenido de humedad inicial
- El tiempo de saturación de la muestra
- La densidad seca inicial.

A continuación, se presenta los resultados del ensayo de expansión unidimensional los cuales fueron mostrados en la sección 3.2.8., los cuales fueron:

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansión Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.020	0.10
0.25	0.035	0.17

0.5	0.070	0.35
1	0.145	0.72
2	0.280	1.40
4	0.450	2.24
8	0.640	3.19
15	0.909	4.53
30	1.370	6.83
60	1.768	8.82
120	2.388	11.91
240	3.160	15.76
420	4.041	20.15
1440	5.708	28.47
1860	5.960	29.73
2880	6.268	31.26
7200	7.320	36.51
8640	7.529	37.55
10080	7.633	38.07
11520	7.704	38.42
12960	7.743	38.62
17280	7.829	39.05
18720	7.851	39.16
20160	7.862	39.21
21600	7.881	39.31
23040	7.896	39.38
28800	7.911	39.46

Tabla N°34: Datos de ensayos de expansión libre
Fuente: Elaboración Propia

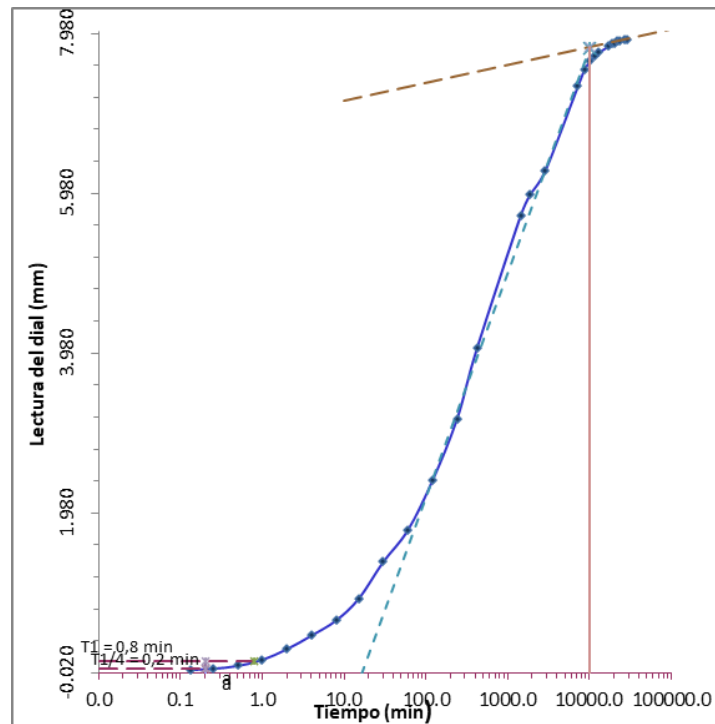


Figura N°25: Curva de Expansión libre
Fuente: Elaboración Propia

Muestra	Estado	Expansión (%)	Presión de hinchamiento (Kg/cm ²)	Potencial de Expansión
Suelo Natural	Inalterado	58.5	14.97	Muy Alto (*)
Suelo Natural	Remoldeado	39.2	7.392	Muy Alto (*)

* El termino se tomó de referencia según los autores mencionados en los métodos indirectos

Tabla N°35: Método directo para determinación de potencial de expansión
Fuente: Expansión Unidimensional (ASTM D4546)

Según la Tabla N°35 el %expansión libre de la muestra de suelo natural (inalterado) y en su estado remoldeado presentan un potencial de expansión muy alto. También se observa de los resultados mostrados en la Tabla N°34 el ensayo de expansión libre tanto en su estado remoldeado demora un total de 22 días.

De los métodos de reconocimiento de suelos expansivos mostrados se observa que el de identificación mineralógica determinó un 12.4% de minerales arcillosos lo cual es un indicio de la existencia de suelo de potencial expansivo bajo; en el método indirecto del suelo presenta un potencial expansivo Muy alto con cambios de volumen severos; y, en el método directo el suelo presenta potencial expansivo muy alto con un 58.5% de expansión en su condición inalterada. Por lo tanto, se infiere que tanto los métodos indirectos como la identificación mineralógica no son pruebas concluyentes para el reconocimiento de un suelo expansivo en un estudio de un suelo. Se debe tomar siempre en cuenta el método directo para determinar con exactitud el potencial expansivo del suelo.

Se concluye que el suelo al tener un potencial de expansión muy alto es conveniente realizar una estabilización química, el cual en la presente investigación se ha especificado utilizar cal y cemento.

6.3. ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO

6.3.1. Análisis de Límites de Atterberg

Se analizó el comportamiento de la plasticidad del suelo mediante la adición de cal y cemento en porcentajes crecientes mediante la determinación de los límites de Atterberg.

Se presenta en la Tabla N°36 el cual muestra un cuadro comparativo los resultados de los límites de Atterberg para las mezclas suelo-cal, suelo-cemento, suelo-2%cal-cemento:

%Agente estabilizador	Límite Líquido			Límite Plástico			Índice de Plasticidad		
	Cal	Cemento	2%cal + Cemento	Cal	Cemento	2%cal + Cemento	Cal	Cemento	2%cal + Cemento
0	66	66	66	28	28	28	38	38	38
1	76	68	62	30	33	37	46	35	25
2	63	74	62	33	33	39	30	42	23
3	65	80	61	38	35	38	27	45	23
4	64	82	59	40	35	40	24	47	19
5	62	80	61	40	36	41	22	44	20
6	62	78	58	40	37	37	22	41	21
7	60	77	58	37	35	38	23	42	20
8	61	77	59	39	38	39	22	39	20

Tabla N°36: Resumen de Límites de Atterberg
Fuente: Elaboración Propia

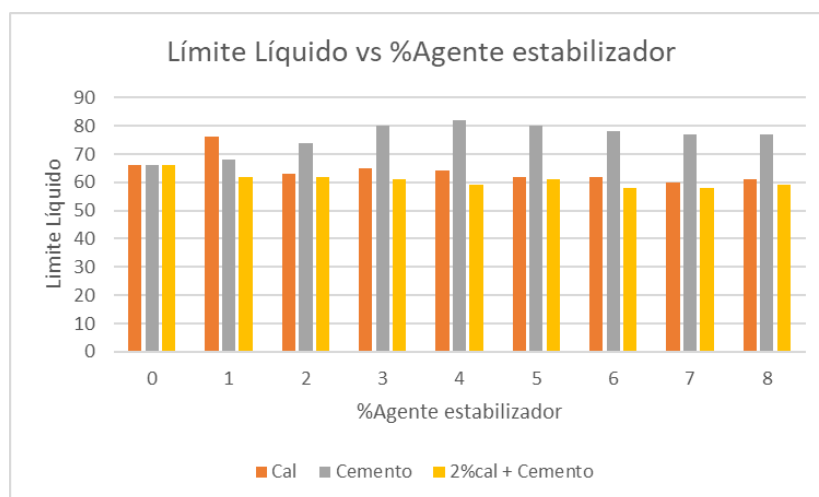


Figura N°26: Comparación de Límite Líquido cal, cemento
Fuente: Elaboración Propia

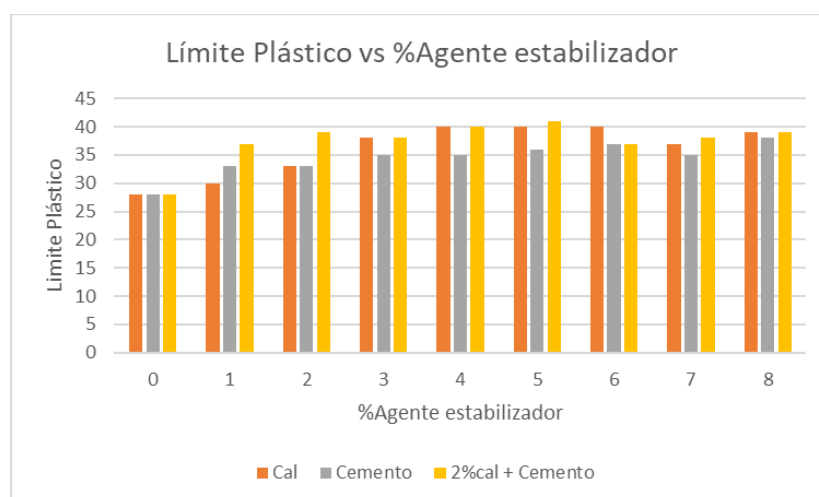


Figura N°27: Comparación de Límite Plástico cal, cemento
Fuente: Elaboración Propia

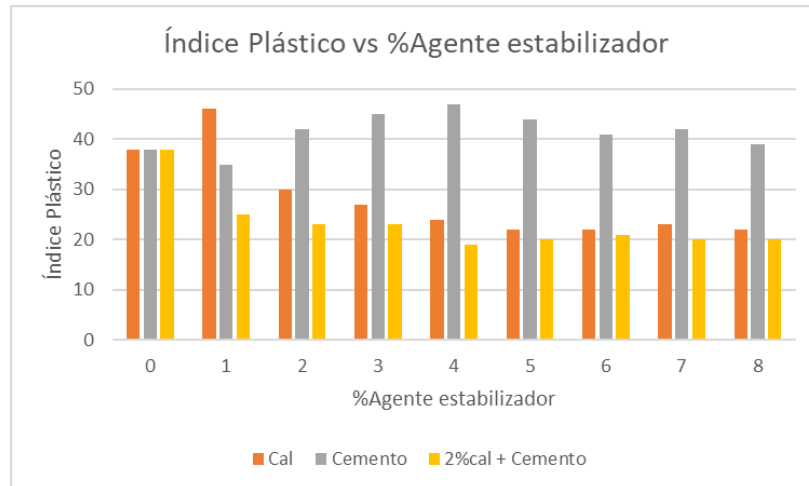


Figura N°28: Comparación de Índice Plástico cal, cemento
Fuente: Elaboración Propia

Se realizó pruebas con distinto agente estabilizador (cal y/o cemento) al suelo natural, que al añadir hasta 5% de cal solamente, se observó que el LL tiende a disminuir luego la variación es mínima, a diferencia de añadir solamente cemento el LL tiende a aumentar considerablemente; en las pruebas de mezcla suelo-cemento, con un 2% cal añadiendo previamente se observó que la tendencia del LL es ligeramente menor que utilizar solamente cal.

Para el LP se observó que, al añadir cal, aumenta hasta un 42.9% y se mantiene constante a partir de un 5% de cal, al añadir solo cemento se observa que aumenta hasta un 35.7%, y para la mezcla suelo cal cemento el LP aumenta en un 46.4%.

Para el IP se observó que disminuye en un 42.1% al añadir cal y se mantiene constante a partir del 5% cal añadida, al añadir el cemento el IP aumento en un 23.7% y para la mezcla suelo-cal-cemento el IP disminuyo en un 47.4%.

Con estas pruebas se demuestra que las propiedades plásticas del suelo natural se reducen al añadir cal y al añadir cal-cemento, a diferencia de utilizar solo cemento que se ha observado que las propiedades plásticas aumentan y en la realización de dichos ensayos se observó que la trabajabilidad de mezclar suelo-cemento no era bueno.

También se determinó el Índice de Fluidez (I_F) y el Índice de Tenacidad (I_T) de cada %agente estabilizador añadido al suelo, estos índices se calculan con la siguiente formula según Raj (2013):

$$I_F = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\log_{10}(N_2/N_1)}$$

Donde:

I_F : Índice de Fluidez del suelo el cual es la pendiente de la curva de flujo obtenida a partir de la prueba del límite líquido

ω_1, ω_2 : Contenido de Humedad correspondiente para N_1 y N_2 golpes respectivamente

N_1, N_2 : Numero de golpes

$$I_T = \frac{IP}{I_F}$$

Donde:

I_T : Índice de Tenacidad

I_F : Índice de Fluidez

IP: Índice de Plasticidad

Se procedió al cálculo de estos índices según las fórmulas mencionadas anteriormente.

A continuación, se presenta los resultados del I_F y I_T

%Agente estabilizador	Índice de Fluidez			Índice de Tenacidad		
	Cal	Cemento	2%cal + Cemento	Cal	Cemento	2%cal + Cemento
0	13.1	13.1	13.1	2.9	2.9	2.9
1	12.3	12.8	15.6	3.7	2.7	1.6
2	19.1	20.9	23.5	1.6	2.0	1.0
3	13.1	26.4	11.5	2.1	1.7	2.0
4	12.1	28.8	18.5	2.0	1.6	1.0
5	8.6	31.8	14.4	2.6	1.4	1.4
6	11.0	20.2	12.7	2.0	2.0	1.7
7	3.3	32.2	15.7	7.0	1.3	1.3
8	14.4	24.9	12.9	1.5	1.6	1.6

Tabla N°37: Resumen de Cálculo de Índice de Fluidez e Índice de Tenacidad
Fuente: Elaboración Propia

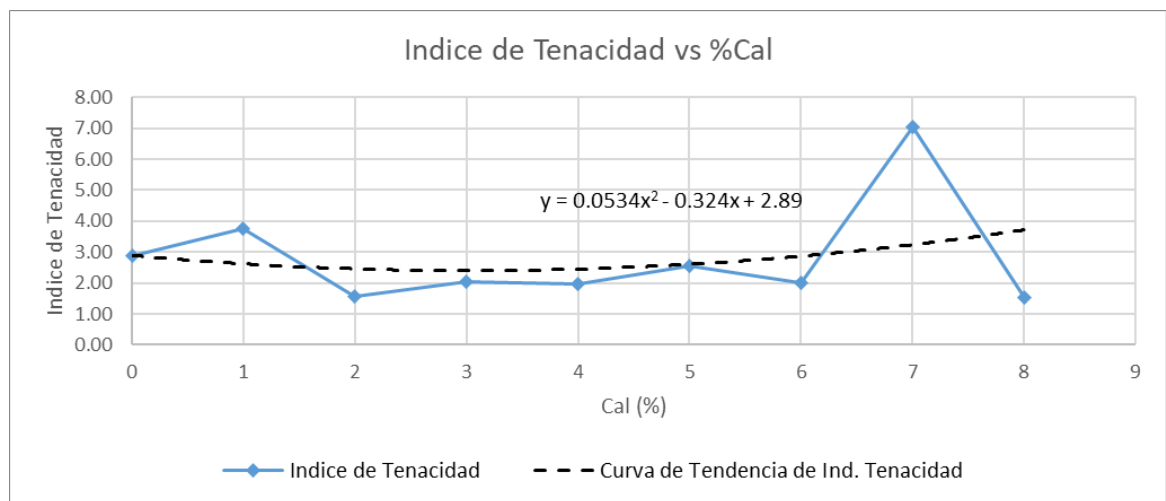
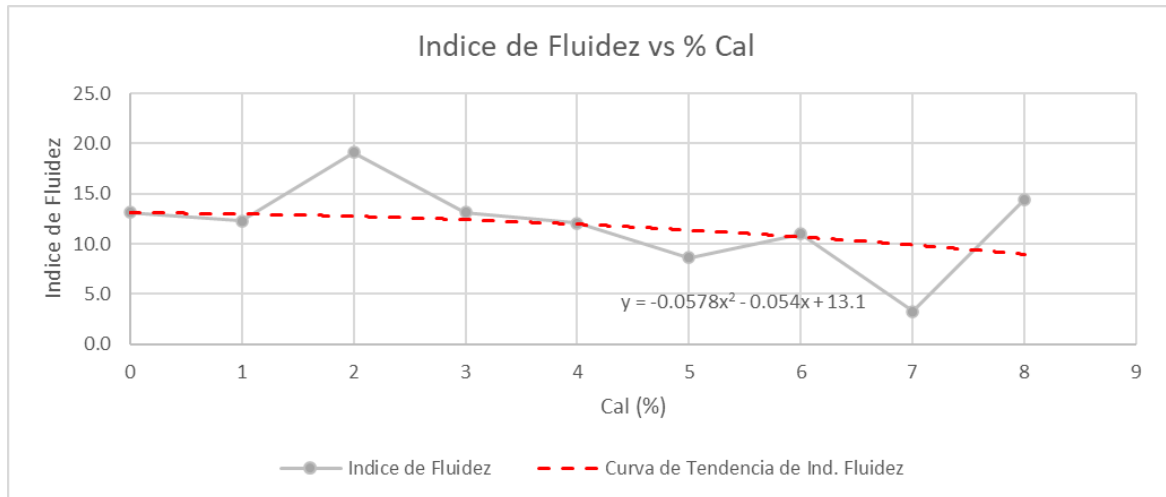
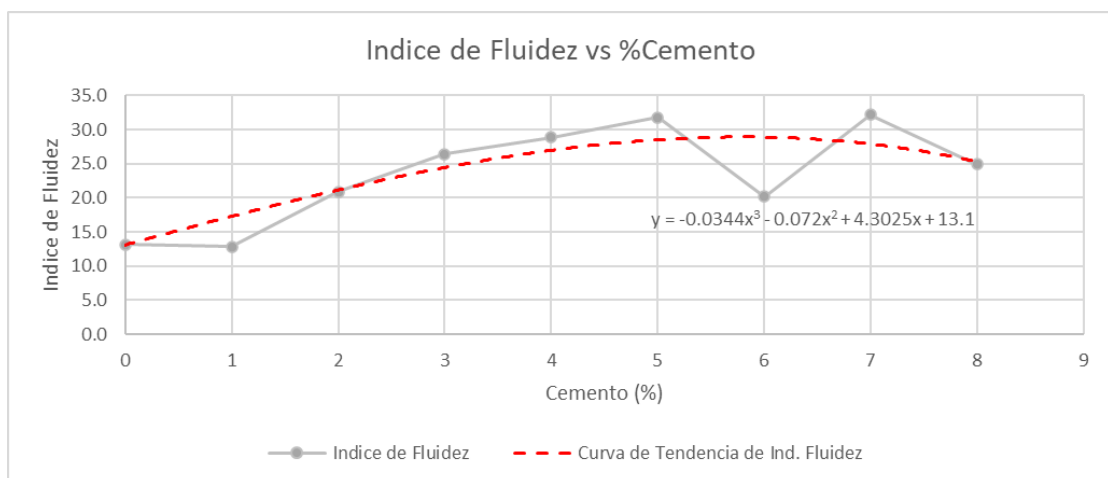
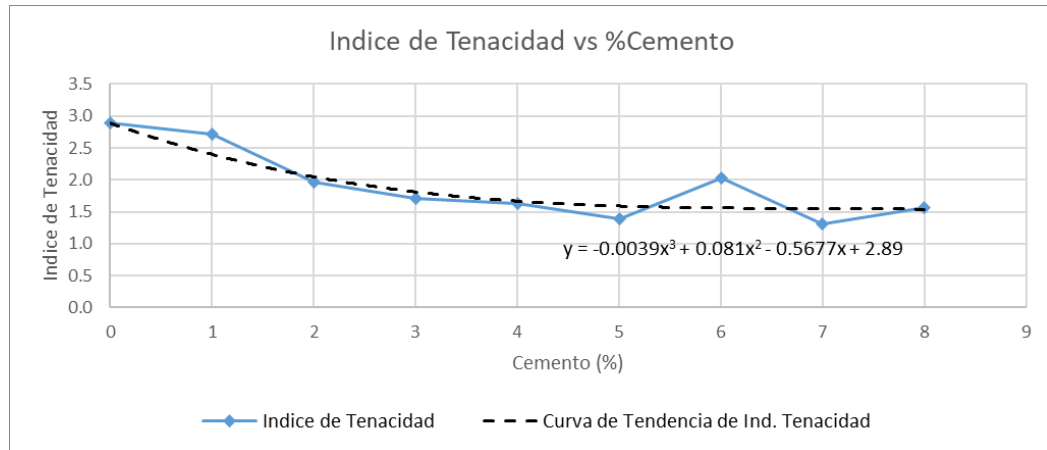


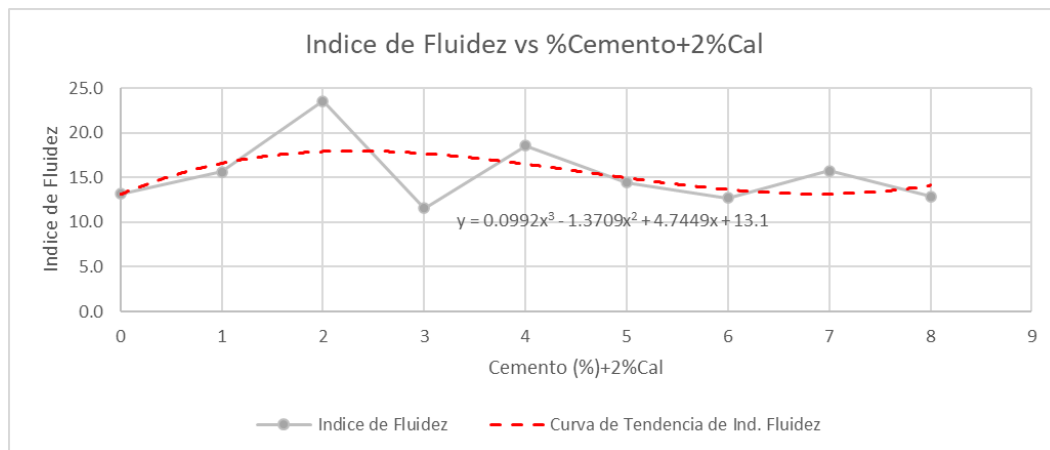
Figura N°29: Gráficos de I_F e I_T vs %Cal, a) Curva de Índice de Fluidez, b) Curva de Índice de Tenacidad
Fuente: Elaboración propia



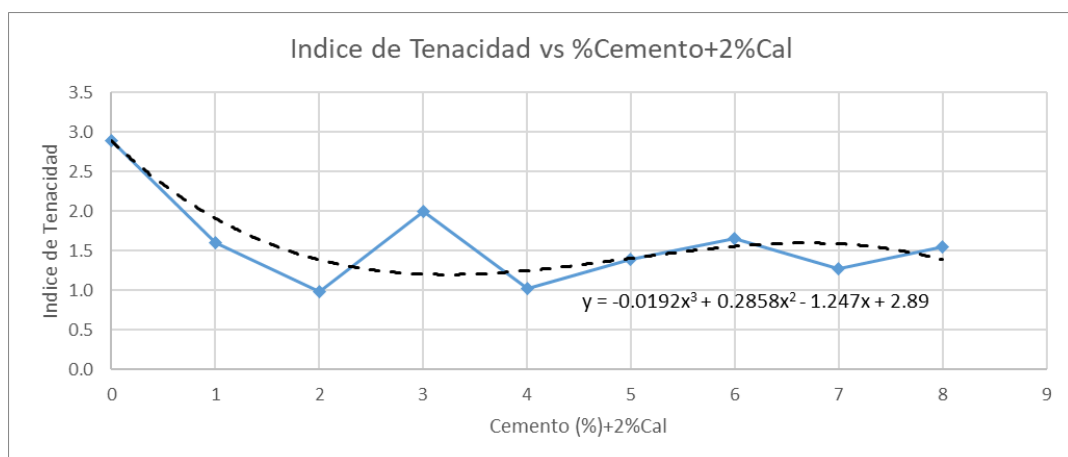


b)

Figura N°30: Gráficos de I_F e I_T vs %Cemento, a) Curva de Índice de Fluidez, b) Curva de Índice de Tenacidad
Fuente: Elaboración propia



a)



b)

Figura N°31: Gráficos de I_F e I_T vs %Cemento+2%Cal, a) Curva de Índice de Fluidez, b) Curva de Índice de Tenacidad
Fuente: Elaboración propia

Se observó en la figura N°29.a que la tendencia del Índice de Fluidez al añadir cal en porcentajes diferentes tiende a disminuir lo que indica que a menor I_F , la resistencia cortante del suelo aumenta, esto se corrobora con el ensayo de compresión simple. En la figura N°29.b se observó que la tendencia de la curva del Índice de Tenacidad tiende a aumentar ligeramente lo que indica que la variación de resistencia del suelo en el estado de Limite Plástico es casi nulo.

En la figura N°30.a, la curva del Índice de Fluidez al añadir cemento en porcentajes diferentes tiende a aumentar notablemente hasta un 6% de cemento y en adelante disminuye ligeramente lo que indica que la resistencia cortante del suelo disminuye. En la figura N°30.b se observa que la tendencia de la curva del Índice de Tenacidad tiende a disminuir lo que indica que la resistencia del suelo en el estado de Limite Plástico disminuye. Se infiere que los efectos del cemento al mezclarse con la arcilla, el I_F aumenta y en el I_T disminuye lo que corrobora que el cemento solo no favorece la trabajabilidad y no es buen agente estabilizador para suelos arcillosos.

En la figura N°31.a, la curva del Índice de Fluidez al añadir 2% cal y cemento en porcentaje variable, tiende a aumentar hasta un 4% de cemento y en adelante disminuye hasta casi igualar el valor inicial lo que indica que la resistencia cortante aumenta para luego disminuir. En la figura N°31.b se observó que la tendencia de la curva del Índice de Tenacidad tiende a disminuir hasta un 4% de cemento y en adelante aumentar ligeramente lo que indica que la resistencia del suelo en el estado de Limite Plástico disminuye. Estos efectos del cemento mezclado con la muestra de suelo con 2% de cal mejora los resultados en los I_F e I_T corroborando lo que mencionan diferentes autores que para mezclar el suelo arcilloso con cemento, previamente se debe mezclar el suelo con un % de cal lo que mejora la trabajabilidad del suelo.

Se observó además en las figuras N°29, 30 y 31 que las curvas de tendencia del Índice de Tenacidad son inversas a las curvas de tendencia del Índice de Fluidez lo que corrobora que en las fórmulas mencionadas anteriormente que el Índice de Tenacidad es inversamente proporcional al Índice de Fluidez.

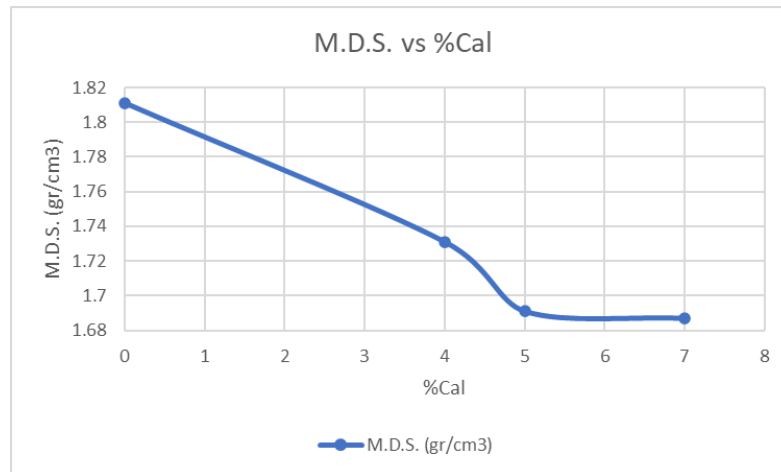
6.3.2. Análisis de dosificación de cal

6.3.2.1. Compactación

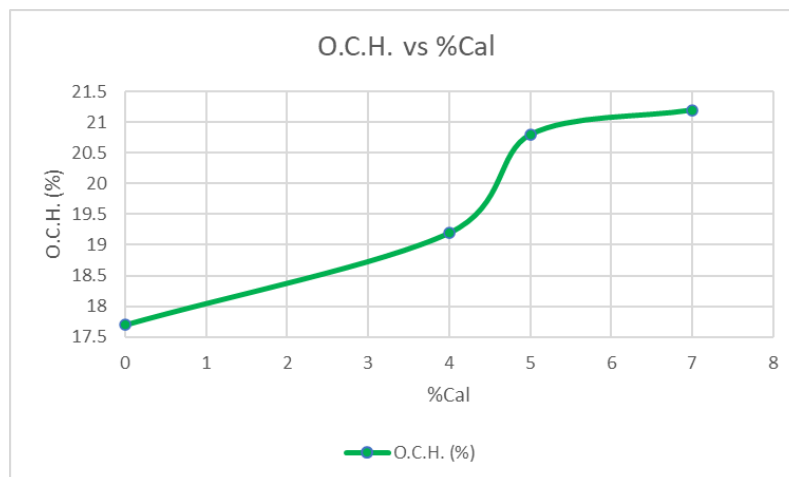
Se analiza el efecto en la M.D.S. y el O.C.H. al añadir cal a la muestra de suelo natural.

Muestra	Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	Óptimo Contenido de Humedad (%)
Suelo	1.811	17.7
Suelo + 4% cal	1.731	19.2
Suelo + 5% cal	1.691	20.8
Suelo + 7% cal	1.687	21.2

Tabla N°38: Resumen de ensayo Proctor Modificado de las mezclas suelo-cal
Fuente: Elaboración Propia



a)



b)

Figura N°32: Gráficos de variación de M.D.S y O.C.H, a) M.D.S. vs %Cal, b) O.C.H. vs %Cal
Fuente: Elaboración propia

En la Figura N°32.a se observó que la M.D.S. disminuye en 4.4% con 4% de cal, añadiendo 5% cal se reduce en un 6.6% y con 7% se reduce un 6.8%. La variación de la M.D.S. entre 5% y 7% de cal es mínima.

En la Figura N°32.b el O.C.H. aumenta un 1.5% de humedad con 4% de cal, y hasta un 3.5% de humedad con 7%. Al igual que en la M.D.S., la variación del

O.C.H. entre 5% y 7% de cal es mínima.

6.3.2.2. Expansión libre

Se muestra las gráficas de expansión libre de las muestras del suelo natural y del suelo mezclado con cal en porcentajes de 4%, 5% y 7%.

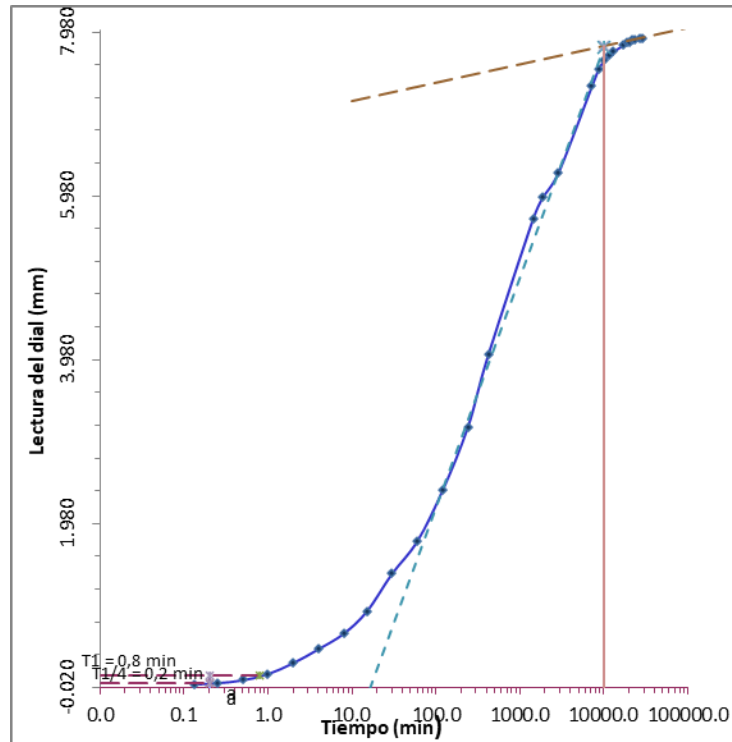


Figura N°33: Curva de Expansión libre del Suelo natural
Fuente: Elaboración propia

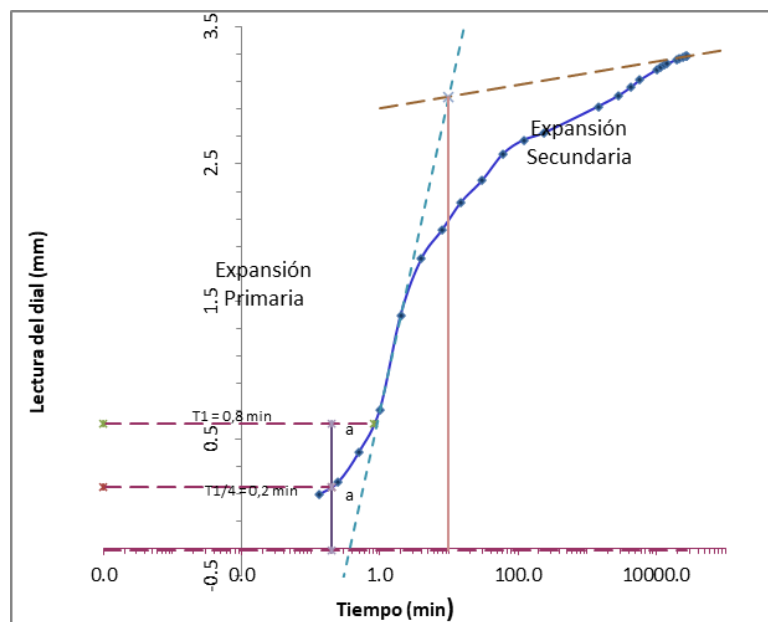


Figura N°34: Curva de Expansión libre del Suelo + 4%cal
Fuente: Elaboración propia

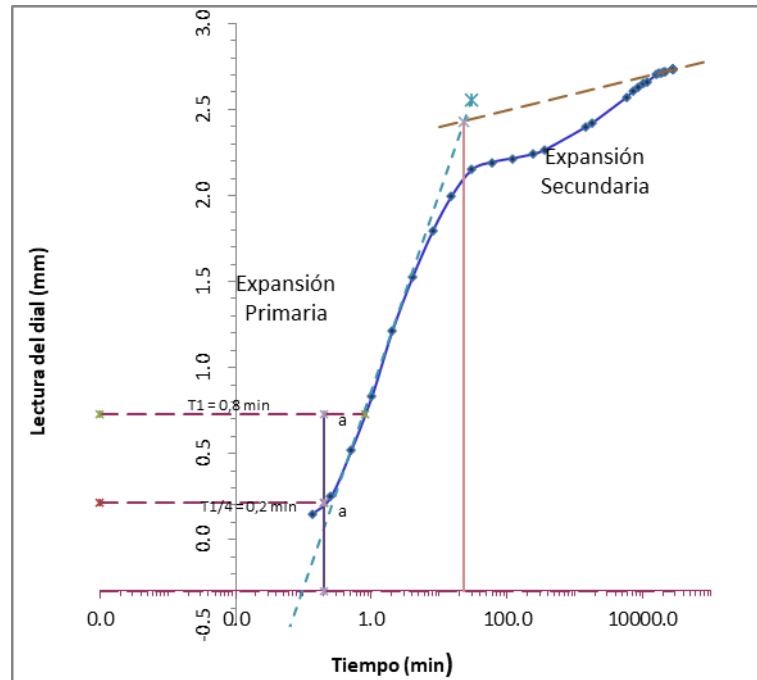


Figura N°35: Curva de Expansión libre del Suelo + 5%cal
Fuente: Elaboración propia

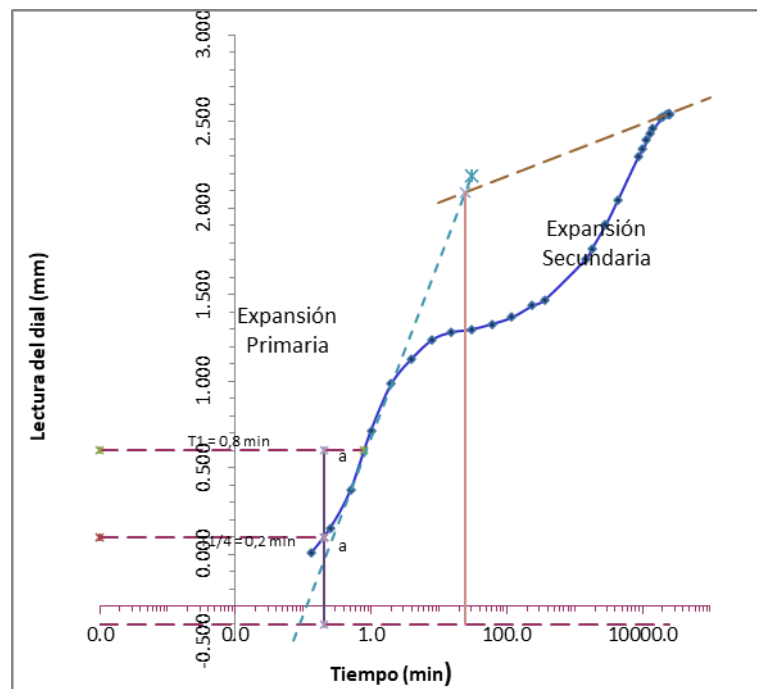


Figura N°36: Curva de Expansión libre del Suelo + 7%cal
Fuente: Elaboración propia

De las gráficas se observa que el suelo con adición de cal reduce la altura de expansión libre, además se observa en las curvas de expansión que al añadir cal se forma dos etapas, una primera etapa en la cual se produce una expansión primaria y una segunda etapa en la cual se produce una expansión secundaria,

esto es debido al proceso exotérmico de la hidratación de la cal viva que tiende al hinchamiento, lo cual es más notorio a mayor cantidad de cal en la mezcla con el suelo.

Se muestra a continuación la tabla de resumen de los resultados de expansión libre, así como los grados de compactación alcanzados en las mezclas.

Muestra	Densidad seca (gr/cm ³)	Expansión Libre (%)	Grado de Compactación (%)	Reducción de expansión (%)
Suelo	1.751	39.2	97	
Suelo + 4% cal	1.710	16.5	99	57.9
Suelo + 5% cal	1.659	13.6	98	65.3
Suelo + 7% cal	1.645	12.4	98	68.3

Tabla N°39: Resumen de datos de expansión libre de las mezclas suelo-cal
Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados de expansión libre tanto del suelo natural como de la mezcla suelo-cal, se procedió a graficar los resultados de %expansión libre vs %cal para determinar el óptimo porcentaje de cal en la mezcla.

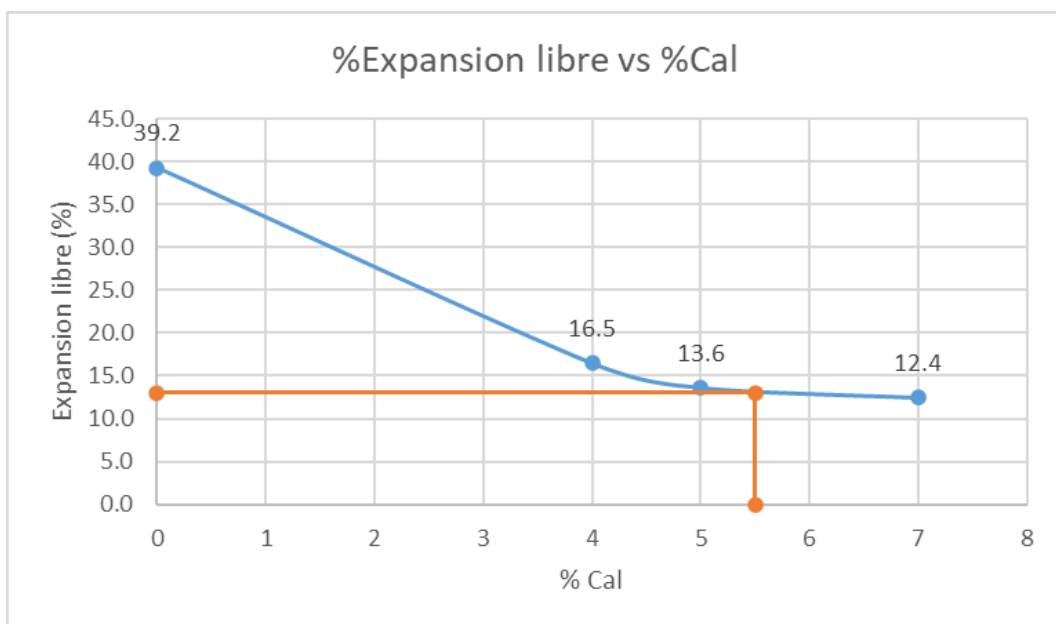


Figura N°37: Curva de %Expansión libre vs %cal
Fuente: Elaboración propia

Se observó en la Figura N°37 que el %expansión libre se reduce a medida que se aumenta el %cal y la variación del %expansión libre para el suelo mezclado con 5% y 7% cal es mínima. Por ende, se determinó según la gráfica que el porcentaje óptimo de cal para el suelo es de 5.5%.

6.3.2.3. Compresión Simple

Se muestra la tabla de resumen de los resultados de ensayo de compresión simple del suelo natural y del suelo mezclado con cal en porcentajes de 4%, 5% y 7%.

Muestra	Cohesión (kg/cm ²)
Suelo	0.4
Suelo + 4% cal	2.3
Suelo + 5% cal	2.8
Suelo + 7% cal	3.5

Tabla N°40: Resumen de datos de compresión simple de las mezclas suelo-cal
Fuente: Elaboración Propia

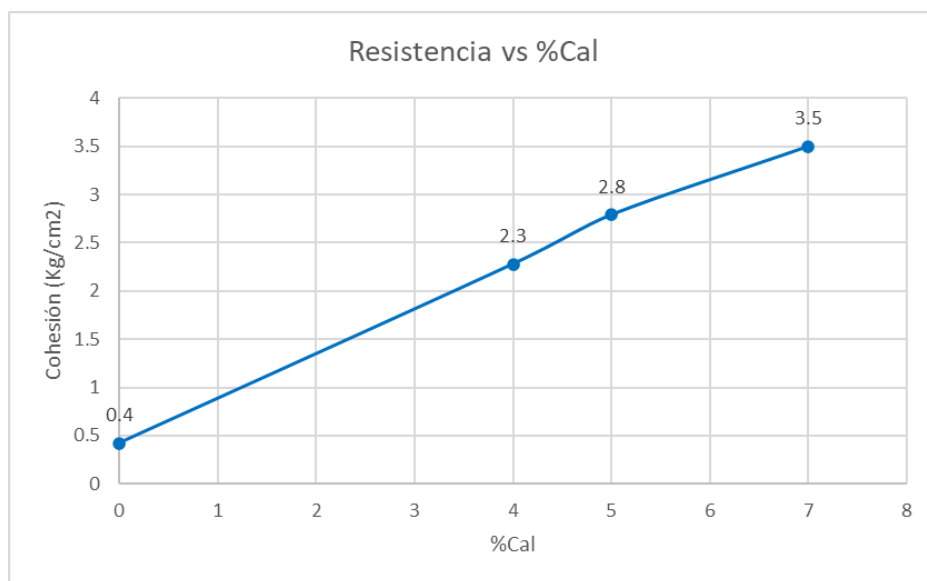


Figura N°38: Curva de Resistencia vs %cal
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura N°38 la resistencia del suelo que en el ensayo de compresión es determinado por el parámetro de cohesión, la tendencia es creciente a medida que aumenta el %cal en la mezcla, el cual tiende a ser lineal.

6.3.3. Análisis de dosificación de cemento

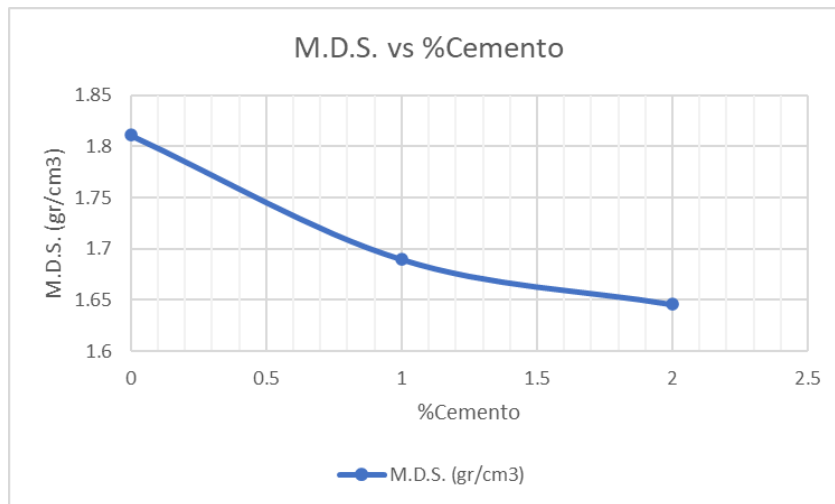
6.3.3.1. Compactación

Se analiza el efecto en la M.D.S. y el O.C.H. al añadir el %Óptimo de cal y las dosificaciones de 1% y 2% de cemento a la muestra de suelo natural.

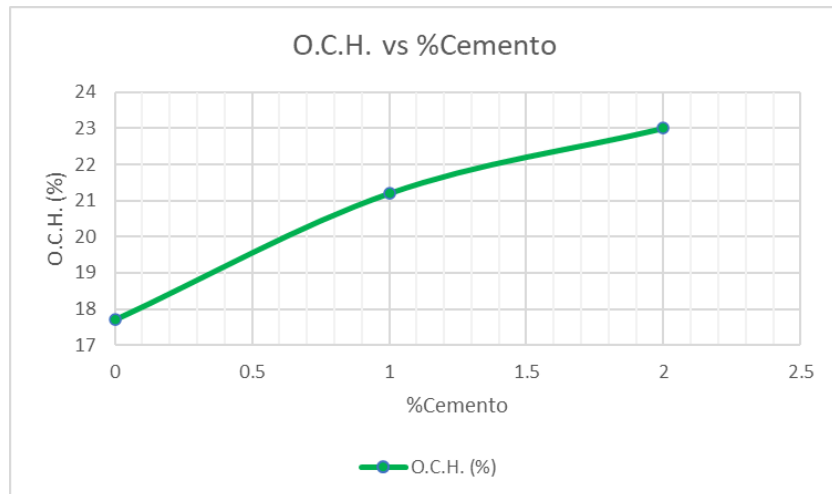
Muestra	Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	Óptimo Contenido de Humedad (%)
Suelo	1.811	17.7

Suelo + %Optimo cal + 1% cemento	1.690	21.2
Suelo + %Optimo cal + 2% cemento	1.646	23.0

Tabla N°41: Resumen de ensayo Proctor Modificado de las mezclas suelo-cal
Fuente: Elaboración Propia



a)



b)

Figura N°39: Gráficos de variación de M.D.S y O.C.H., a) M.D.S. vs %Cemento, b) O.C.H. vs %Cemento
Fuente: Elaboración propia

En la Figura N°39.a se observó que la M.D.S. disminuye en 6.7% con 1% de cemento y con un 2% cemento disminuye en un 9.1%. En la Figura N°39.b el O.C.H. aumenta un 3.5% de humedad con 1% de cemento, y hasta un 5.3% de humedad con 2%. Se observa tanto en la M.D.S y el O.C.H. el cemento tiene una mayor influencia en comparación con la cal.

6.3.3.2. Expansión libre

Se muestra las gráficas de expansión libre de las muestras del suelo mezclado con el %Óptimo de cal y el cemento en porcentajes de 1% y 2%.

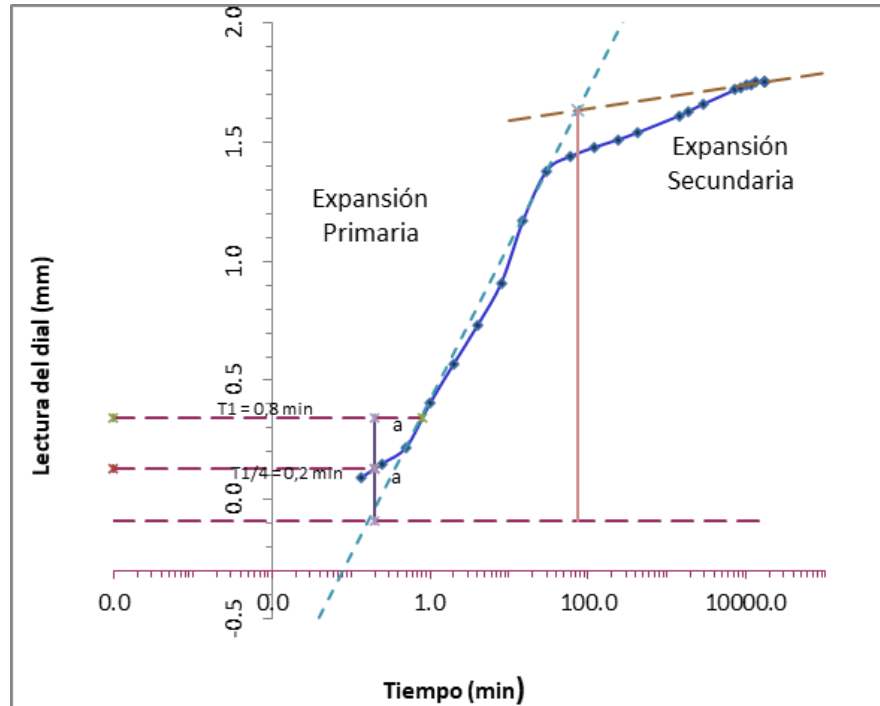


Figura N°40: Curva de Expansión libre del Suelo + 1%cemento
Fuente: Elaboración propia

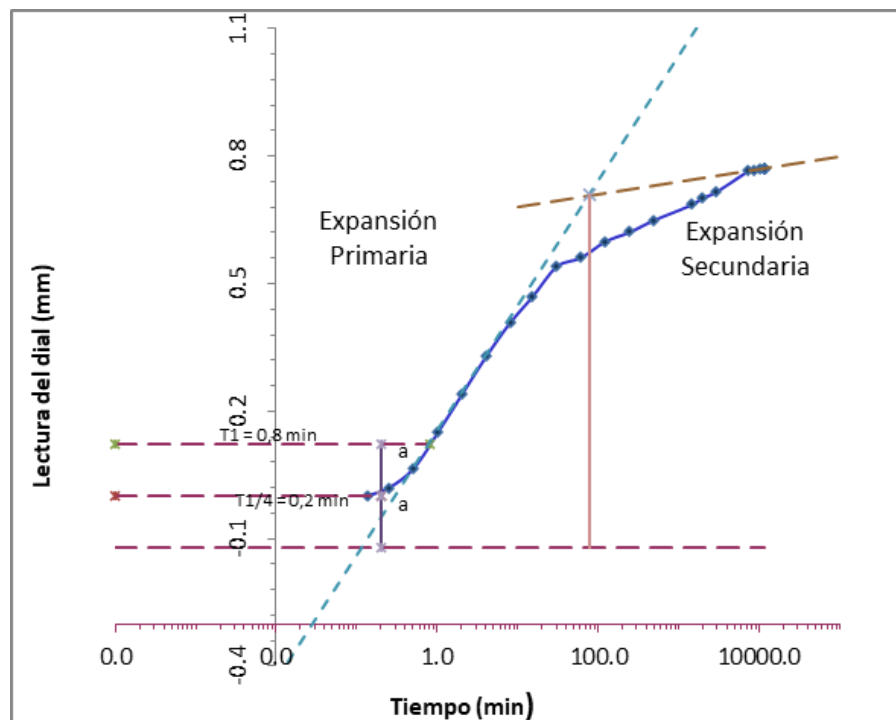


Figura N°41: Curva de Expansión libre del Suelo + 2%cemento
Fuente: Elaboración propia

Se observa como el añadir cemento al suelo en comparación con la cal tiene una mayor reducción en su altura de expansión libre además se observa en las curvas de expansión que al añadir cemento la expansión tiende a ser más estable es decir la variación es mínima a partir del día 7 del ensayo lo cual tiene concordancia con el tiempo de endurecimiento del cemento.

Se muestra a continuación la tabla de resumen de los datos de expansión libre, así como los grados de compactación alcanzados en la mezcla.

Muestra	Densidad seca (gr/cm ³)	Expansión Libre (%)	Grado de Compactación (%)	Reducción de expansión (%)
Suelo	1.751	39.2	97	
Suelo + %Optimo cal + 1% cemento	1.681	8.6	99	78.1
Suelo + %Optimo cal + 2% cemento	1.678	4.1	102	89.5

Tabla N°42: Resumen de datos de expansión libre de las mezclas suelo-cemento
Fuente: Elaboración Propia

Con los datos mostrados en la Tabla N°42, se procederá a realizar la gráfica de la expansión vs %cemento.

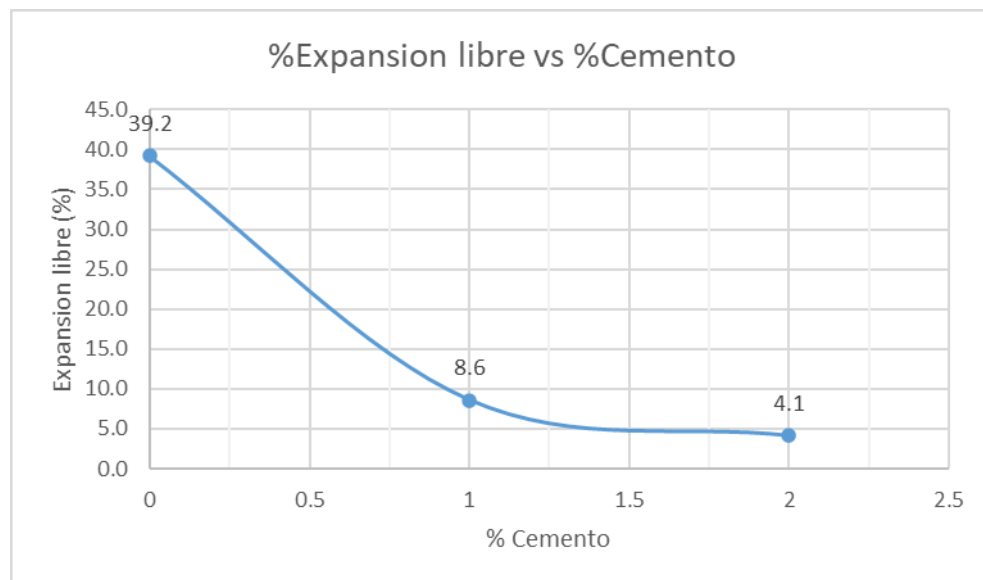


Figura N°42: Curva de %Expansión libre vs %cemento
Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Figura N°42 que el %Expansión libre disminuye del suelo previamente mezclado con el %Optimo de cal hasta un 4.1% con un 2% de cemento añadido. Por ende, se determina de la figura que el porcentaje óptimo de cemento para el suelo es de 2.0%.

6.3.3.3. Compresión Simple

Se muestra la tabla de resumen de los resultados de ensayo de compresión simple del suelo natural y del suelo mezclado con el %Óptimo de cal y cemento en porcentajes de 1% y 2%.

Muestra	Cohesión (kg/cm ²)
Suelo	0.4
Suelo + %Óptimo cal + 1% cemento	6.2
Suelo + %Óptimo cal + 2% cemento	9.7

Tabla N°43: Resumen de datos de compresión simple de las mezclas suelo-cemento
Fuente: Elaboración Propia

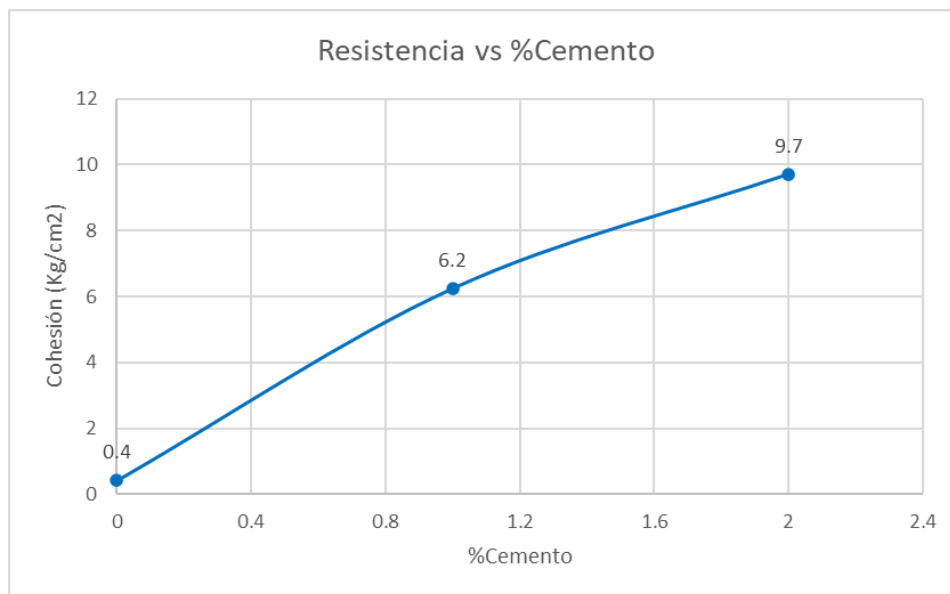


Figura N°43: Curva de Resistencia vs %cemento
Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Figura N°43 la resistencia del suelo que en el ensayo de compresión es determinado por el parámetro de cohesión, este aumenta considerablemente con la adición de %Óptimo de cal y el %cemento.

CONCLUSIONES

Se determinó en base a ensayos de laboratorio de límites de consistencia, contenido de arcilla, contenido mineralógico, hinchamiento libre y presión de hinchamiento que el suelo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara se clasifica como un suelo con potencial expansivo muy alto.

Se logro estabilizar el suelo expansivo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara mediante la adición de cal y cemento Portland en proporciones óptimas determinadas de ensayos en laboratorio.

Se logro reducir el potencial expansivo del suelo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara al ser mezclado con cal en diferentes proporciones; inicialmente el suelo presentó una expansión libre de 39.2%; luego al adicionarse 4%, 5% y 7% de cal se obtuvieron 16.5%, 13.6% y 12.4% de expansión libre respectivamente; con lo cual se demostró que la adición de cal reduce la expansión libre del suelo expansivo.

Se determino el valor de 5.5% como %óptimo de cal a ser adicionado al suelo expansivo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara, valor que se obtuvo al construir la gráfica de %expansión vs %cal mostrada en la Figura N°37.

Se logro una mayor reducción del porcentaje de expansión libre del suelo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara al ser mezclado previamente con él %Optimo de cal y luego ser añadido cemento Portland en diferentes proporciones, al adicionarse 1% y 2% de cemento Portland a la mezcla de suelo+%Optimo de cal se obtuvo un 8.6% y 4.1% de expansión libre respectivamente.

Se determino el valor de 2.0% como %óptimo de cemento Portland a ser adicionado al suelo expansivo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara.

Los resultados obtenidos para esta investigación son válidos exclusivamente para el suelo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara, distrito de Pariñas, provincia de Talara, departamento de Piura. Por tal motivo si se tratara de ampliar los resultados para otro tipo de arcillas expansivas pertenecientes a otro sitio será necesaria la investigación de las características del suelo.

RECOMENDACIONES

Es importante mencionar que el suelo de la Urb. Sudamérica de la ciudad de Talara necesita mejorar y/o controlar su potencial expansivo previo a su utilización como soporte de las fundaciones en obras de ingeniería, pues como ya se ha podido corroborar mediante ensayos de laboratorio, el suelo presenta un potencial expansivo muy alto, lo cual ocasionaría daños a las estructuras construidas sobre este tipo de suelo sin mejoramiento provocando pérdidas económicas cuantiosas.

En la preparación de mezclas de suelo-cal y suelo-cal-cemento en laboratorio, se observó la pérdida de humedad por reacción exotérmica de la cal y el cemento, debiendo añadirse agua a fin de controlar la humedad de la mezcla dentro de los parámetros preestablecidos, por lo que su aplicación en campo a fin de obtener los resultados deseados deberá controlarse la humedad.

Es importante tener presente al momento de realizar los ensayos de límites de consistencia de las mezclas de suelo-cal y suelo-cal-cemento los tiempos de reacción de la cal y el cemento con el agua añadida, para el caso de las mezclas de suelo-cal el tiempo de ejecución es de un máximo de 16 horas y para el caso de añadir cemento a la mezcla anterior controlando el agua añadida el tiempo de ejecución es de 3 horas.

Se recomienda realizar los ensayos de sales y sulfatos a la muestra de suelo a estudiar a fin de determinar el tipo de cemento portland a utilizar.

Se deberá tener presente las recomendaciones de la Norma CE.020 para el caso de estabilizar suelos arcillosos con cemento Portland, para ello previamente se deberá añadir entre 1% y 2% de cal para una mejor trabajabilidad. Si se quisiese agregar cemento Portland al suelo en estado natural (húmedo) no podrían mezclarse bien y se tendría dificultad para realizar los trabajos tanto en laboratorio como en campo.

Se recomienda realizar ensayos de expansión controlada a las mezclas suelo-cal y suelo-cal-cemento con otra metodología como el método B o C de la norma ASTM D4546, ya que el método A aplicado al presente estudio, no se obtuvieron los resultados deseados debido el endurecimiento prematuro de los especímenes sumergidos en agua durante el ensayo.

Por lo general siempre es recomendable añadir cal y/o cemento en suelos arcillosos con alto potencial expansivo en proporciones bondadosas realizando el mezclado y compactación por métodos que se estimen convenientes a fin de estabilizar el cambio volumétrico del suelo. Además de controlar el cambio volumétrico favorece la resistencia del suelo arcilloso en gran proporción.

Ante la evidencia y/o sospecha de suelos expansivos o con alto contenido de arcillas es recomendable inicialmente realizar ensayos de laboratorio de expansión libre a fin de caracterizar su potencial expansivo, luego del cual deberá ser complementado con los demás ensayos, así también deberá realizarse todos los ensayos a la mezcla de suelo-cal y suelo-cal-cemento a fin de determinar los porcentajes óptimos que da los mejores resultados de mitigar la expansión del suelo, y posterior aplicación en campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altmeyer, W. T. (1955). Discussion of Engineering Properties of Expansive Clays. *Proceedings ASCE*, 81.
- ANCADE; ANTER; IECA. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Instituto Nacional del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).
- Bauzá Castelló, J. D. (s.f.). *El tratamiento de suelos arcillosos mediante cal*. https://www.academia.edu/24191738/EL_TRATAMIENTO_DE_SUELOS_ARCILLOSOS_MEDIANTE_CAL
- Behzad, K. (2012). Foundations on Expansive Soils: A Review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 3231-3237.
- Carrero, R. A. (2018). *Estudio de Cimentación y Estructura por suelos expansivos Barriada Santa Teresa*. [Tesis de Fin de Grado, Universidad de Sevilla]. Repositorio Insitucional, España. <https://hdl.handle.net/11441/82332>
- Castro Cuadra, A. F. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Alicia, Lima-Peru. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/10054>
- Castro Cuba Valencia, M. E. (1992). *Suelos expansivos en Talara*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Alicia, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/4072>
- Chen, F. H. (1975). *Foundations on Expansive Soils*. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B. M. (2012). *Fundamento de Ingeniería de cimentaciones* (7ma ed.). Ciudad de México, México: Cengage Learning.
- Fratelli, M. G. (1993). *Suelos, Fundaciones y Muros*. Caracas, Venezuela: Bonalde Editores.
- Hernández Garzón, M. J. (2021). *Identificación de materiales de mejoramiento en suelos expansivos destinados como suelo de fundación para viviendas en el sector nor-oriental de la ciudad de Tunja*. [Tesis de Grado, Universidad de Santo Tomás]. Repositorio institucional, Colombia. <http://hdl.handle.net/11634/33715>
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Holtz, W. G., & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *ASCE Transactions*, 121, 641-677.
- Leed D, J., & Ian F, J. (2012). Chapter: Expansive Soils. En J. Burland (Ed.), *ICE manual of geotechnical engineering. Volume 1, geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation*. (págs. 413-441). United Kingdom (UK): ICE Publishing.
- Norma CE.020 Suelos y Taludes. (2021). En *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Perú.
- NTP 334.009. (2005). En INDECOPI, *Cemento Portland requisitos* (Tercera ed., pág. 18). Lima, Perú.
- NTP 339.082. (2000). En INDECOPI, *Cemento Portland. Especificación de la performance* (Segunda ed., pág. 23). Lima, Perú.
- PCA. (s.f.). *Portland Cement Association, Estados Unidos de América*. soil-cement: https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete-applications/is411.pdf?sfvrsn=2b54fdbf_2
- Raj, P. P. (2013). *SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING* (Segunda Edición ed.). Delhi: Pearson.
- Ranganatham, B. V., & Satyanarayana, B. (1965). A Rational Method of Predicting

- Swelling Potential for Compacted Expansive Clays. *Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 92-96.
- Rojas Foinquinos, J., & Alva Hurtado, J. (2006). *Arcillas y lutitas expansivas en el Norte y Nororiente Peruano*. Artículo, CISMID, Perú.
- Sanchez Alban, M. A. (2014). *Establización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua, Provincia de Manabí*. [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. Red de Repositorio Latinoamericano, Ecuador. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2966974>
- Seed, H. B., Woodward, R. J., & Lundgren, R. (1962). Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal ASCE, Soil Mechanics and Foundations Div.*, 88.
- Skempton, A. (1953). The Colloidal "Activity" of Clays. *INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING*, 1, 57-61.
- Vasquez Bustos, J. A. (2014). *Recopilación y análisis de cada uno de los metodos para el tratamiento de suelos expansivos en caminos carreteros*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Autonoma de Mexico]. Repositorio Institucional, Mexico. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/419261>

ANEXOS

Anexo A: Ensayos suelo natural.....	79
Anexo B: Ensayos suelo-cal.....	107
Anexo C: Ensayos suelo-cemento.....	138

Anexo A

Ensayos suelo natural

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **MARZO 2023**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural

ENSAYO CONTENIDO DE HUMEDAD - REFERENCIA ASTM D2216

Contenido de Humedad (%) : **9.5**
Método "B"

Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA

: DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

: ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

: URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

: MARZO 2023

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - REFERENCIA ASTM D6913 / D6913M

Método "B"

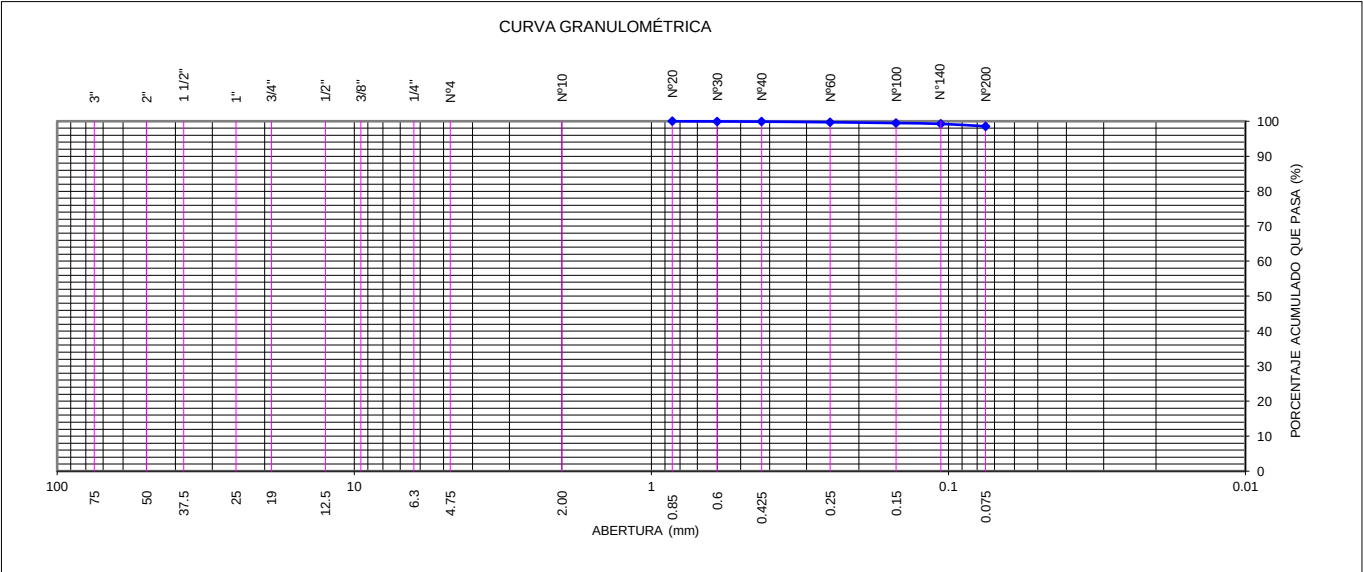
Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	75.000	-	-	
2"	50.000	-	-	
1 1/2"	37.500	-	-	
1"	25.000	-	-	
3/4"	19.000	-	-	
1/2"	12.500	-	-	
3/8"	9.500	-	-	
1/4"	6.300	-	-	
Nº4	4.750	-	-	
Nº10	2.000	-	-	
Nº20	0.850	-	-	100.0
Nº30	0.600	0.1	0.1	99.9
Nº40	0.425	0.1	0.1	99.9
Nº60	0.250	0.2	0.3	99.7
Nº100	0.150	0.2	0.5	99.5
Nº140	0.106	0.2	0.8	99.2
Nº200	0.075	0.7	1.5	98.5
FONDO		98.5		

% Grava	:	----
% Arena	:	1.5
% Finos	:	98.5

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318		
Límite Líquido	:	66
Límite Plástico	:	28
Índice Plástico	:	38

Clasificación SUCS ASTM D2487 : CH

Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) : A-7-6(23)



Elaborado por : Diego Sanchez

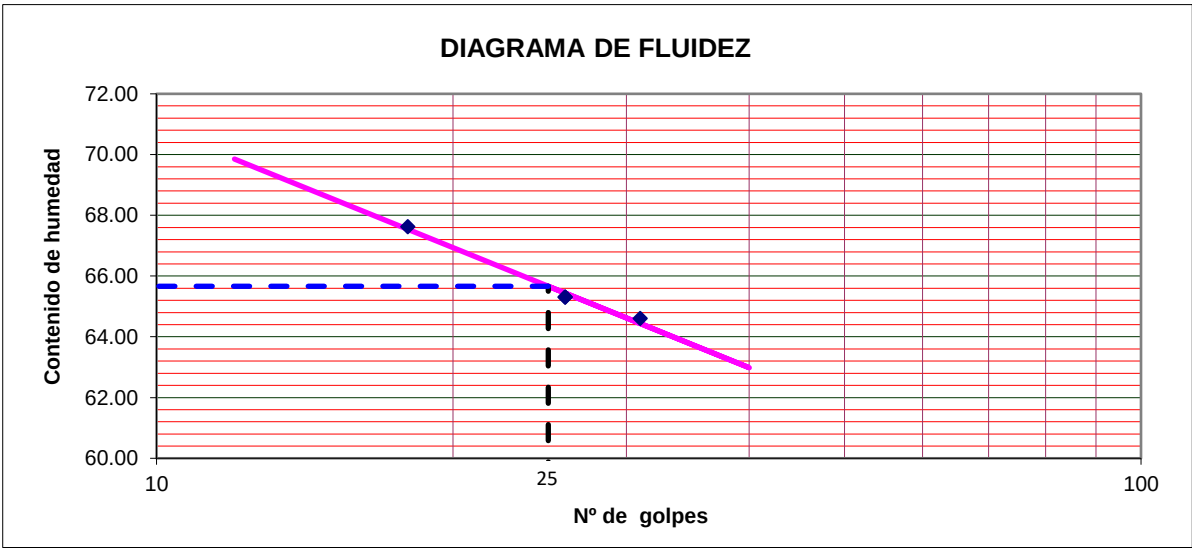
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : MARZO 2023

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 66
LÍMITE PLÁSTICO : 28
ÍNDICE PLÁSTICO : 38

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **MARZO 2023**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo natural

GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVO DE SOLIDOS - REFERENCIA ASTM D854

Método "B"

Gravedad Específica Relativo de Sólidos a Temperatura de Ensayo	:	2.676
Temperatura de Ensayo (°C)	:	26.8
Gravedad Específica Relativo de Sólidos a 20 °C	:	2.671

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : MARZO 2023

Muestra : Suelo Natural

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	99.9
Nº 60	0.250	99.7
Nº 140	0.106	99.2
Nº 200	0.075	98.6

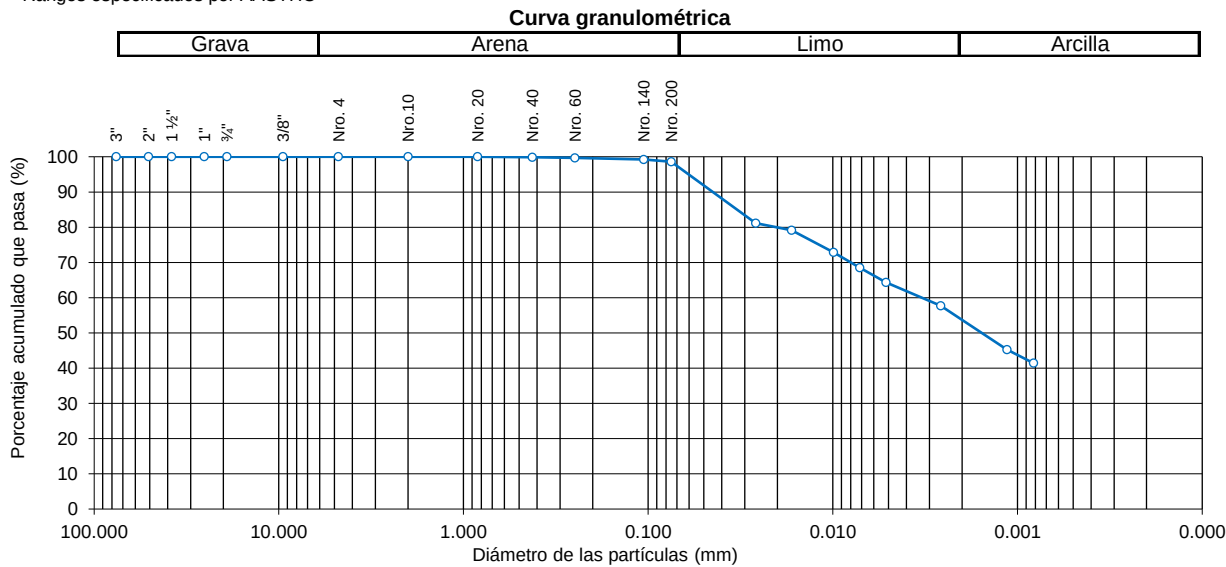
Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	1.5	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	46.4	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	52.1	< 0.002 mm	**

* Rangos especificados por ASTM
** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D854)	2.67
--	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0262	81.13
0.0167	79.17
0.0099	72.84
0.0072	68.56
0.0052	64.31
0.0026	57.69
0.0011	45.23
0.0008	41.40

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

ASTM D4943

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : MARZO 2023

Muestra : Suelo Natural

ESPECIMEN		01	02
Plato de contracción	N°	LC-3	LC-2
Masa del plato de contracción	g	22.64	21.72
Masa del plato de contracción + suelo humedo	g	54.08	52.05
Masa del plato de contracción + suelo seco	g	41.76	40.42
Masa de la capa de suelo seco	g	19.12	18.70
Contenido de humedad del suelo	%	64.44	62.19
Masa de capa de suelo seco + parafina	g	21.88	21.66
Masa de capa de suelo seco + parafina, en agua	g	12.33	12.35
Masa de agua desplazada de suelo seco + parafina	g	9.55	9.31
Densidad del agua	g/cm3	1.00	1.00
Volumen de la capa de suelo seco + parafina	cm3	9.55	9.31
Masa de la parafina	g	2.76	2.96
Densidad de la parafina	g/cm3	0.88	0.88
Volumen de la parafina	cm3	3.14	3.36
Volumen de suelo seco	cm3	9.19	8.99
Límite de Contracción	%	9.90	9.61
Promedio	%	9.76	

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR ESTANDAR

ASTM D698

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN : MARZO 2023

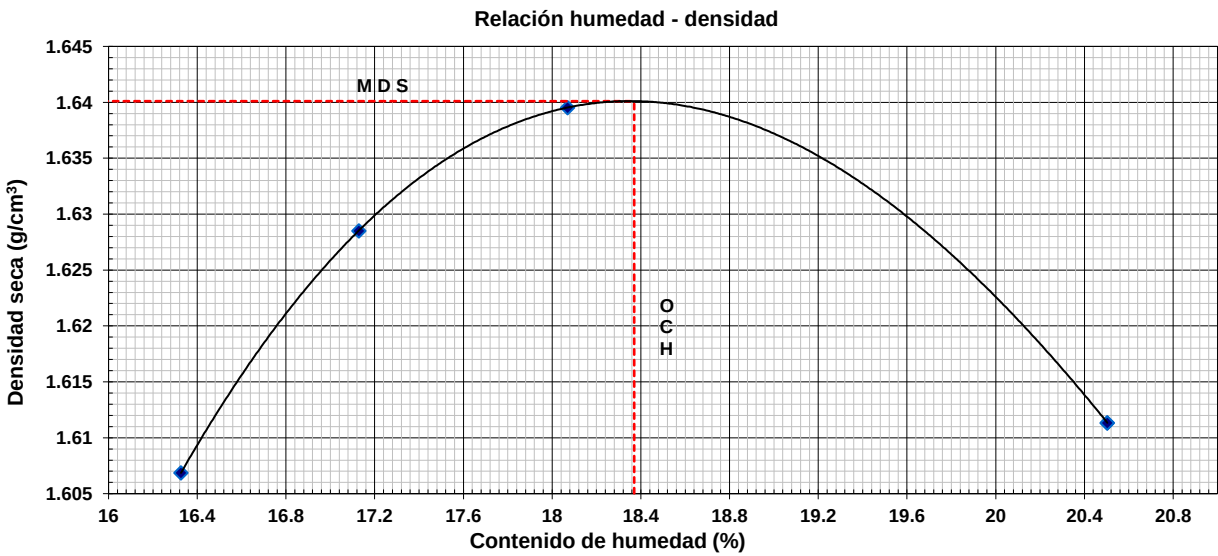
Muestra : Suelo Natural

Método de preparación : Seco

Descripción del pisón : Manual

Peso suelo compactado + molde	(g)	5948.70	5984.20	6010.50	6016.00	
Peso molde	(g)	4214.10	4214.10	4214.10	4214.10	
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1734.60	1770.10	1796.40	1801.90	
Volumen del molde	(cm³)	927.99	927.99	927.99	927.99	
Densidad húmeda	(g/cm³)	1.869	1.907	1.936	1.942	
Peso muestra húmeda + tara	(g)	299.40	305.10	308.80	299.00	
Peso muestra seca + tara	(g)	283.40	285.30	289.70	277.00	
Peso de tara	(g)	185.40	169.70	184.00	169.70	
Peso de agua	(g)	16.00	19.80	19.10	22.00	
Peso de la muestra seca	(g)	98.00	115.60	105.70	107.30	
Contenido de humedad	(%)	16.33	17.13	18.07	20.50	
Densidad seca	(g/cm³)	1.607	1.629	1.640	1.611	

Máxima Densidad Seca	M.D.S.	1.640	g/cm³
Óptimo Contenido de Humedad	O.C.H.	18.37	%



Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR MODIFICADO

ASTM D1557

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : MARZO 2023

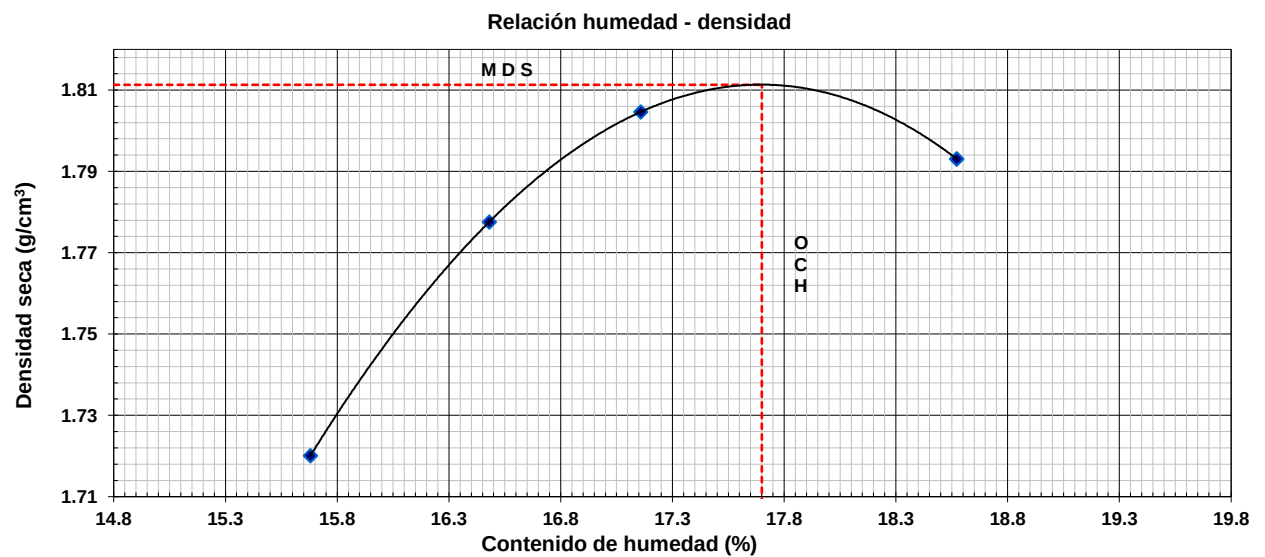
Muestra : Suelo Natural

Método de preparación : Seco

Descripción del pisón : Manual

Peso suelo compactado + molde	(g)	6009.00	6085.10	6126.30	6137.40	
Peso molde	(g)	4134.00	4134.00	4134.00	4134.00	
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1875.00	1951.10	1992.30	2003.40	
Volumen del molde	(cm ³)	942.30	942.30	942.30	942.30	
Densidad húmeda	(g/cm ³)	1.990	2.071	2.114	2.126	
Peso muestra húmeda + tara	(g)	233.71	275.00	223.00	288.50	
Peso muestra seca + tara	(g)	218.50	254.30	204.40	263.00	
Peso de tara	(g)	121.50	128.70	96.00	125.70	
Peso de agua	(g)	15.21	20.70	18.60	25.50	
Peso de la muestra seca	(g)	97.00	125.60	108.40	137.30	
Contenido de humedad	(%)	15.68	16.48	17.16	18.57	
Densidad seca	(g/cm ³)	1.720	1.778	1.805	1.793	

Máxima Densidad Seca	M.D.S.	1.811	g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	O.C.H.	17.70	%



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : MARZO 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural (Condicion parcialmente saturada)

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	50.11
Altura	: mm	102.75
Area	: mm ²	1972.34
Densidad Humeda	: gr/cm ³	2.07
Densidad seca	: gr/cm ³	1.79
Contenido de Humedad	: %	15.72
L/D	:	2.05
Peso Relativo de Sólidos	:	2.670
Grado de Saturacion	: %	85.82

Parámetros de Resistencia

Carga última (kPa)	:	1242.23
Cohesión (kPa)	:	621.12
Cohesión (kg/cm ²)	:	6.33

Nota :

El espécimen fue remoldeado al 97% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

MARZO 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado

:

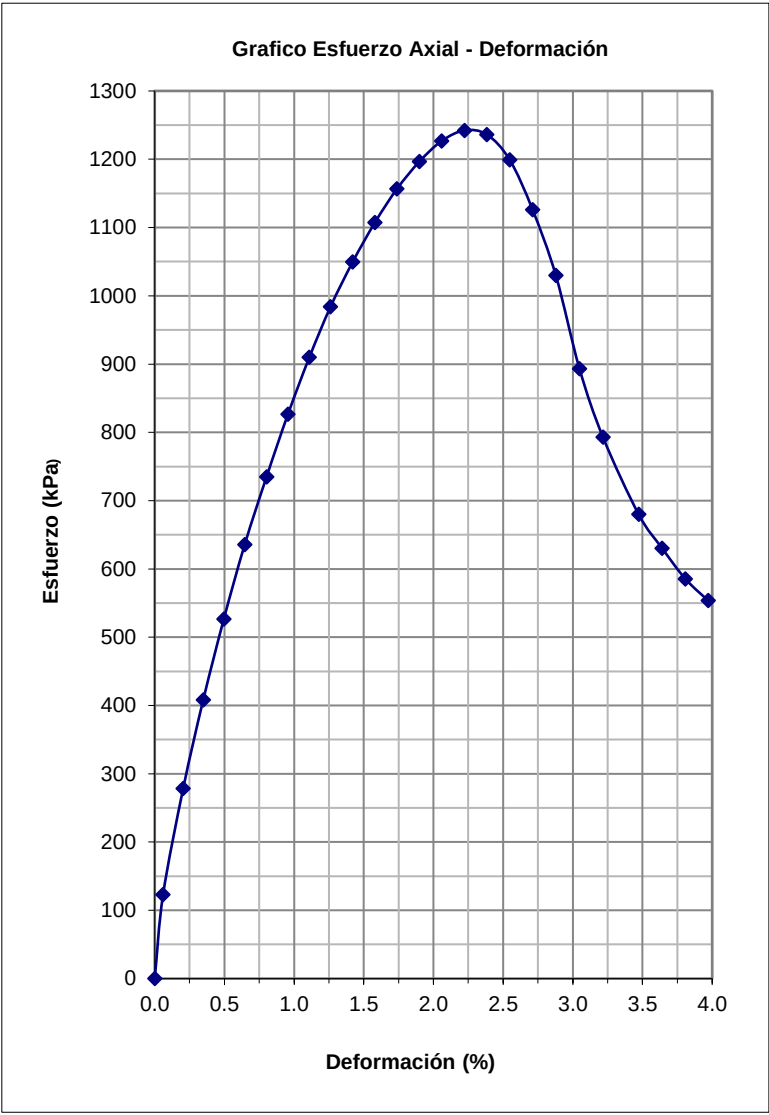
Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)

Muestra

:

Suelo Natural (Condicion parcialmente saturada)

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)		:	50.11
Área Inicial (mm²)		:	1972.34
Altura Inicial (mm)		:	102.75
Deformacion	Area	Fuerza	Esfuerzo
%	Corregida mm²	Axial (Newton)	(kPa)
0.00	0.0	0.0	0.0
0.06	1973.5	244.0	123.0
0.20	1976.4	550.5	278.4
0.35	1979.2	806.3	408.0
0.50	1982.2	1040.1	526.5
0.65	1985.2	1255.3	635.6
0.80	1988.3	1451.4	735.0
0.96	1991.4	1632.1	826.6
1.11	1994.5	1796.6	909.9
1.26	1997.5	1942.8	984.0
1.42	2000.8	2072.2	1049.7
1.58	2004.0	2186.4	1107.5
1.74	2007.2	2283.1	1156.5
1.90	2010.5	2362.4	1196.7
2.06	2013.8	2421.9	1226.9
2.22	2017.2	2452.2	1242.2
2.38	2020.5	2440.1	1236.1
2.55	2023.9	2367.3	1199.2
2.71	2027.3	2223.3	1126.2
2.88	2030.8	2033.0	1029.8
3.05	2034.3	1763.7	893.3
3.22	2037.9	1565.7	792.9
3.47	2043.3	1342.8	680.0
3.64	2046.9	1244.9	630.3
3.81	2050.4	1156.4	585.4
3.97	2053.9	1093.4	553.5



Nota :

El espécimen fue remoldeado al 97% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : ABRIL 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural (condición saturada)

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	34.87
Altura	: mm	69.81
Area	: mm ²	954.98
Densidad Humeda	: gr/cm ³	1.83
Densidad seca	: gr/cm ³	1.37
Contenido de Humedad	: %	33.70
L/D	:	2.00
Peso Relativo de Sólidos	:	2.670
Grado de Saturacion	: %	95.15

Parámetros de Resistencia

Carga última (kPa)	:	81.80
Cohesión (kPa)	:	40.90
Cohesión (kg/cm ²)	:	0.42

Nota :

El espécimen fue remoldeado al 75% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

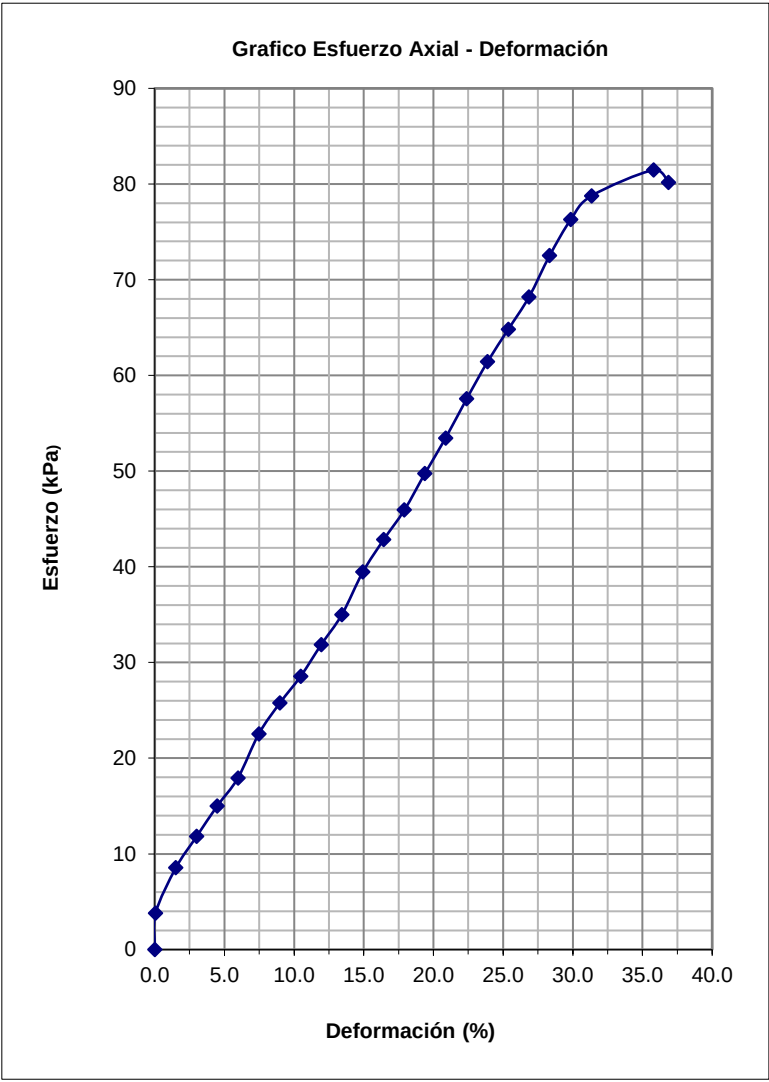
FECHA DE EJECUCIÓN : ABRIL 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)

Muestra : Suelo Natural (condición saturada)

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)		:	34.87
Área Inicial (mm²)		:	954.98
Altura Inicial (mm)		:	69.81
Deformacion	Area	Fuerza	Esfuerzo
%	Corregida	Axial	
	mm²	(Newton)	(kPa)
0.00	0.0	0.0	0.0
0.06	955.6	3.1	3.8
1.52	969.7	7.6	8.5
3.00	984.6	10.7	11.8
4.48	999.7	13.7	15.0
5.97	1015.6	16.6	17.9
7.47	1032.1	21.0	22.6
8.98	1049.2	24.0	25.8
10.47	1066.7	26.7	28.6
11.95	1084.5	29.9	31.9
13.43	1103.1	32.9	35.0
14.93	1122.6	37.1	39.5
16.43	1142.7	40.3	42.8
17.92	1163.4	43.3	45.9
19.38	1184.6	46.9	49.7
20.87	1206.8	50.5	53.4
22.38	1230.4	54.4	57.6
23.89	1254.7	58.1	61.4
25.37	1279.6	61.4	64.8
26.86	1305.6	64.6	68.2
28.34	1332.6	68.7	72.5
29.86	1361.4	72.3	76.3
31.36	1391.2	74.7	78.8
35.79	1487.4	77.2	81.5
36.86	1512.5	76.0	80.2



Nota :

El espécimen fue remoldeado al 75% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
 PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : ABRIL 2023

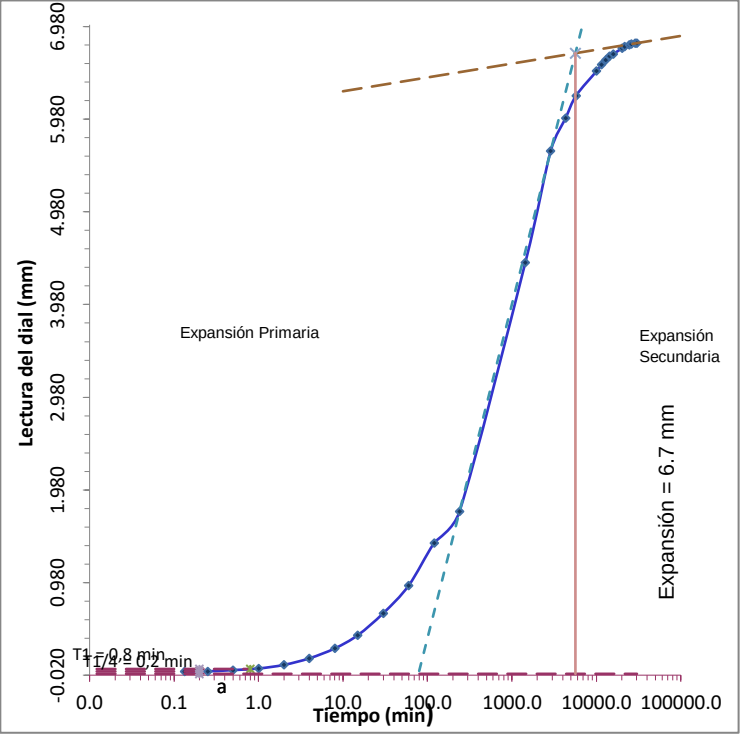
ENSAYO DE EXPANSIÓN DE CARGA CONTROLADA (MÉTODO A) - ASTM D 4546

Muestra : Suelo Natural
 Estado : Remoldeado

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	61.63	61.63
Altura(mm)	20.02	18.51
Densidad Seca (gr/cm3)	1.73	1.88
Densidad Húmeda (gr/cm3)	2.01	2.39
Húmedad (%)	15.72	26.93
Saturación (%)	77.60	100.00
Gravedad de solidos (Gs)	2.67	2.67
Relacion de vacios (e)	0.541	0.419

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.019	0.09
0.25	0.021	0.10
0.5	0.035	0.17
1	0.052	0.26
2	0.091	0.45
4	0.162	0.81
8	0.269	1.34
15	0.412	2.06
30	0.649	3.24
60	0.948	4.74
120	1.406	7.02
240	1.748	8.73
1440	4.431	22.13
2880	5.638	28.16
4320	5.991	29.93
5760	6.235	31.14
10080	6.500	32.47
11520	6.570	32.82
12960	6.620	33.07
14400	6.660	33.27
15840	6.685	33.39
20160	6.745	33.69
21600	6.765	33.79
24480	6.785	33.89
25920	6.792	33.93
28800	6.800	33.97
30240	6.802	33.98



EXPANSIÓN LIBRE (%) : 33.46

ETAPA DE CONSOLIDACION

Presion (kg/cm2)	Lectura dial (mm)	e
0	6.802	1.065
0.25	5.879	0.993
0.50	4.978	0.924
1.00	3.775	0.832
2.00	2.389	0.725
3.00	1.530	0.659
4.00	1.078	0.624
5.00	0.659	0.592
6.00	0.328	0.566
7.00	0.075	0.547
8.00	-0.052	0.425

Presión de control: 7.044 kg/cm2

Nota:
 El espécimen fue remoldeado al 95% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
 Elaborado por : Diego Sanchez
 Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

ABRIL 2023

ENSAYO DE EXPANSIÓN DE CARGA CONTROLADA (MÉTODO A) - ASTM D 4546

Muestra

:

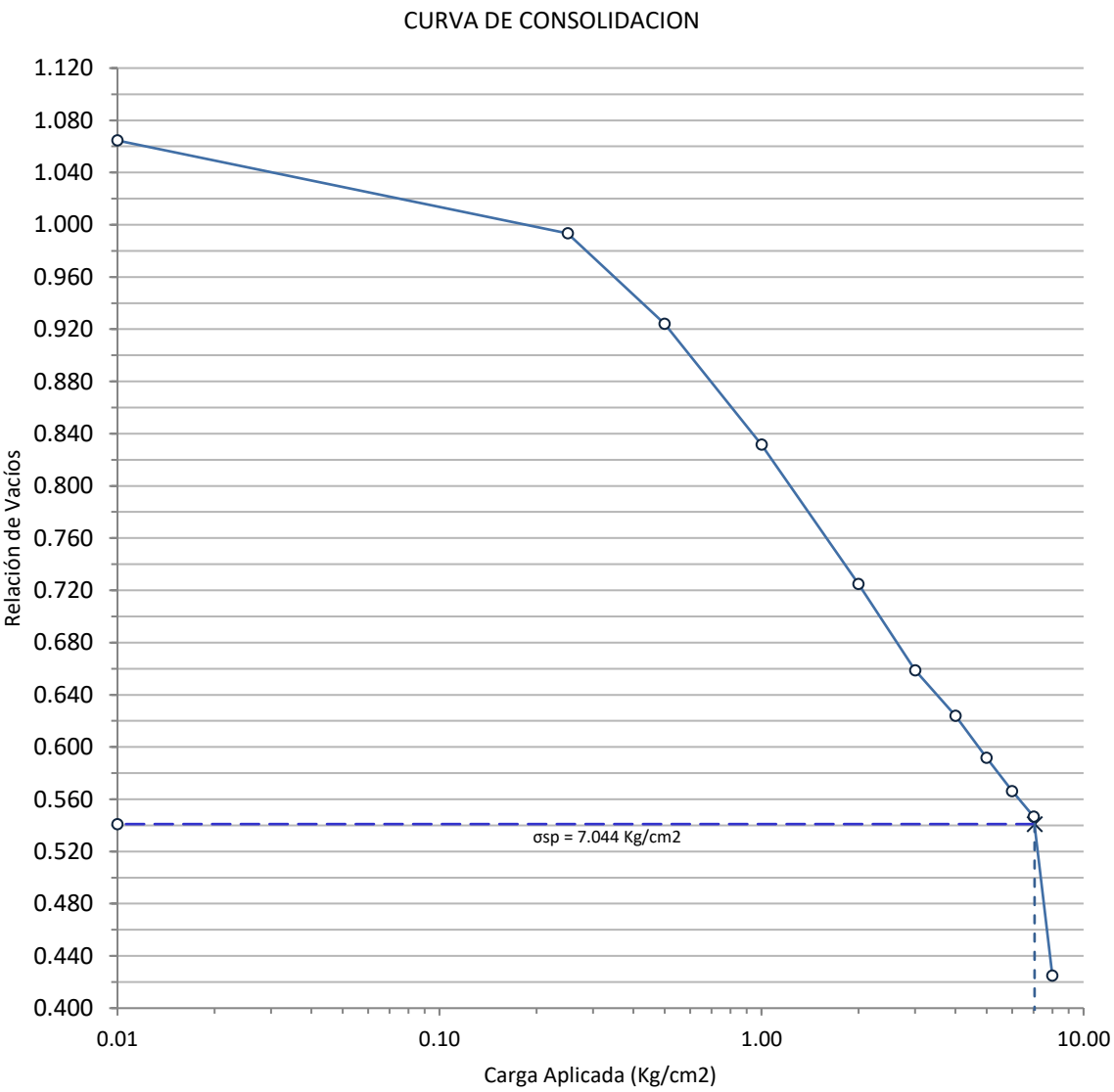
Suelo Natural

Estado

:

Remoldeado

ETAPA DE CONSOLIDACION



Nota:
El espécimen fue remoldeado al 95% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : ABRIL 2023

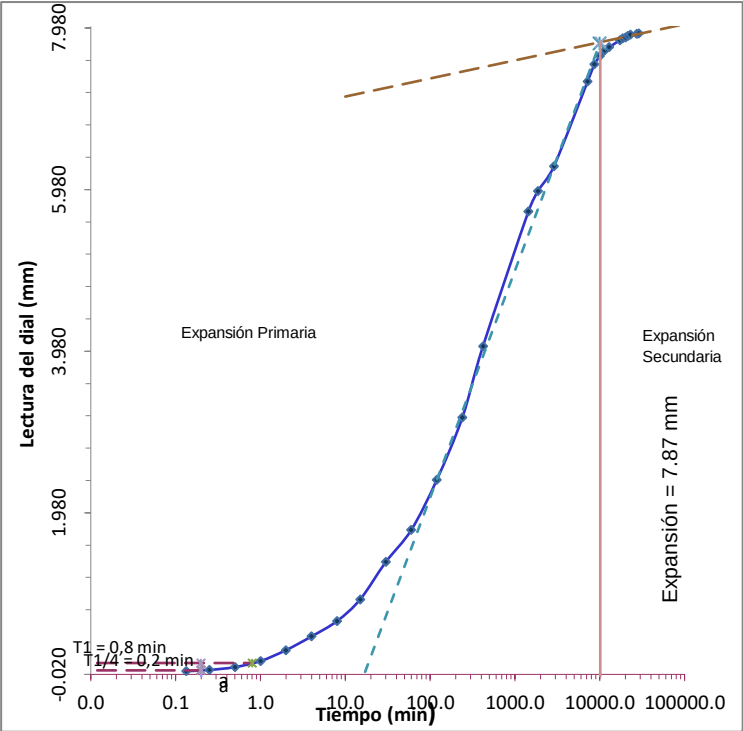
ENSAYO DE EXPANSIÓN DE CARGA CONTROLADA (MÉTODO A) - ASTM D 4546

Muestra : Suelo Natural
 Estado : Remoldeado

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	61.74	61.74
Altura(mm)	20.05	19.88
Densidad Seca (gr/cm3)	1.75	1.89
Densidad Húmeda (gr/cm3)	1.93	2.35
Húmedad (%)	10.14	24.54
Saturación (%)	51.62	100.00
Gravedad de solidos (Gs)	2.67	2.67
Relacion de vacios (e)	0.524	0.412

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.020	0.10
0.25	0.035	0.17
0.5	0.070	0.35
1	0.145	0.72
2	0.280	1.40
4	0.450	2.24
8	0.640	3.19
15	0.909	4.53
30	1.370	6.83
60	1.768	8.82
120	2.388	11.91
240	3.160	15.76
420	4.041	20.15
1440	5.708	28.47
1860	5.960	29.73
2880	6.268	31.26
7200	7.320	36.51
8640	7.529	37.55
10080	7.633	38.07
11520	7.704	38.42
12960	7.743	38.62
17280	7.829	39.05
18720	7.851	39.16
20160	7.862	39.21
21600	7.881	39.31
23040	7.896	39.38
28800	7.911	39.46



EXPANSIÓN LIBRE (%) : 39.23

ETAPA DE CONSOLIDACION

Presion (kg/cm2)	Lectura dial (mm)	e
0	7.911	1.126
0.25	6.530	1.021
0.50	5.275	0.926
1.00	3.998	0.828
2.00	2.569	0.720
4.00	1.305	0.624
8.00	-0.168	0.512

Presión de control: 7.392 kg/cm2

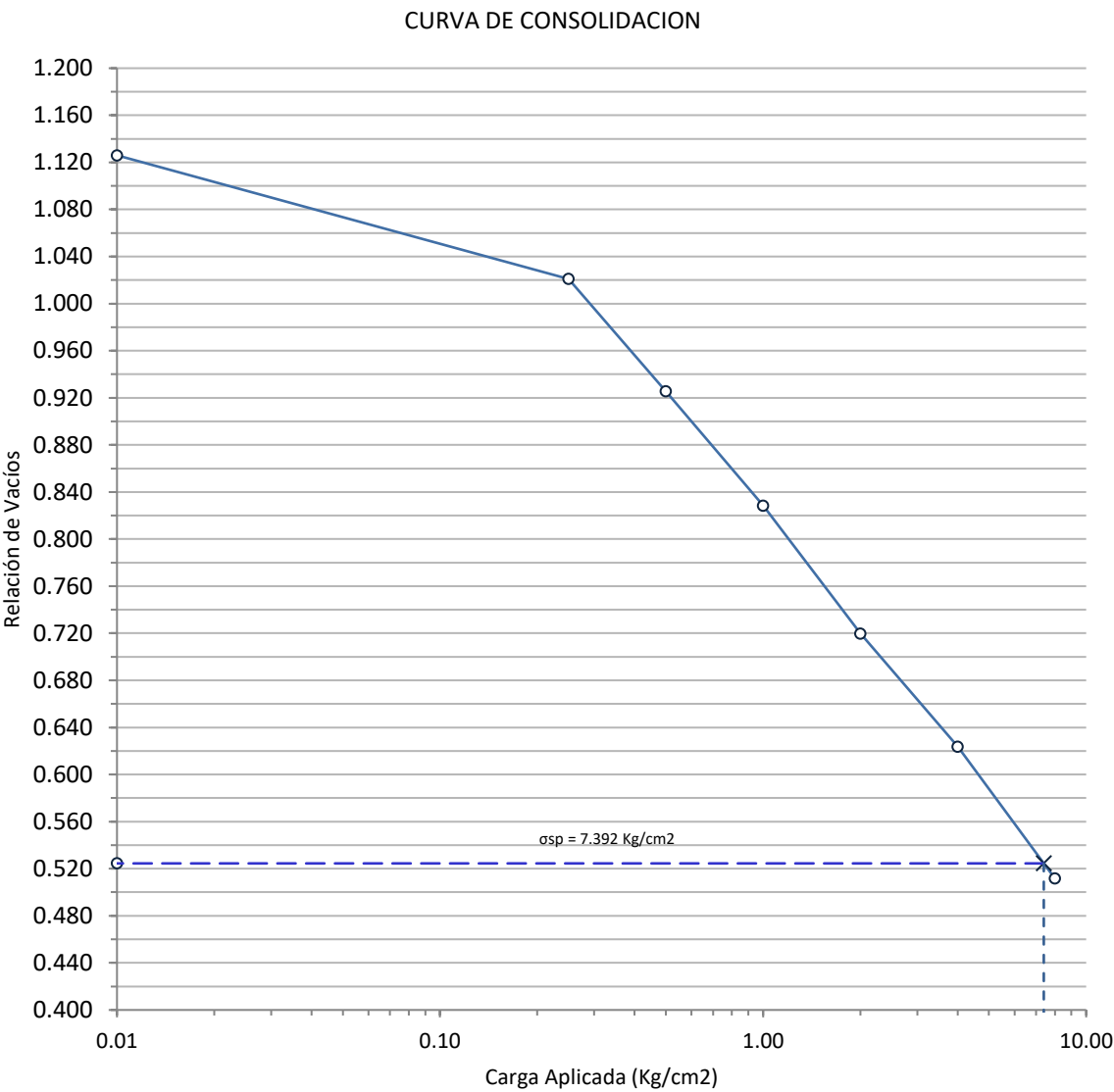
Nota:
 El espécimen fue remoldeado al 97% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
 Elaborado por : Diego Sanchez
 Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : ABRIL 2023

ENSAYO DE EXPANSIÓN DE CARGA CONTROLADA (MÉTODO A) - ASTM D 4546

Muestra : Suelo Natural Estado : Remoldeado

ETAPA DE CONSOLIDACION



Nota:
El espécimen fue remoldeado al 97% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO QUÍMICO FIC

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

SOLICITANTE : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

REGISTRO : LQU23-810

PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN SUELOS EXPANSIVOS PROVENIENTE DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA"

UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA- PIURA

TIPO DE MUESTRA: SUELO

TIPO DE EXPLORACIÓN: CALICATA; C-1, C-2

PROFUNDIDAD(m): 0.00 – 1.60

RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 10 -10-2023

ANÁLISIS DE:	SULFATOS (SO ₄)= ASTM D 516 AASHTO T 290 ppm	SALES SOLUBLES TOTALES MTC E 219 ppm	pH MTC E 129 ASTMD 4372
TIPO DE EXPLORACIÓN: CALICATA: C-1, C-2 TIPO DE MUESTRA: SUELO PROFUNDIDAD(m): 0.00 – 1.60	4 286	6 682	6,88

Lima, 16 de octubre del 2023


CARMEN M. REYES CUBAS
Dra. JEFA (e) DEL LABORATORIO
Laboratorio de Química de la UNI-FIC

El Laboratorio no responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra

Av. Tupac Amaru 210, Código Postal: 15333, Perú
Apartado Postal 1301 Lima 100 - Perú / Telefax: (511) 481 - 9845
Central Telefónica: 481-1070/Anexos: 4020 - 4003

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
Accreditation
Commission



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Civil

LABORATORIO QUÍMICO FIC

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

SOLICITANTE : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

REGISTRO : LQU23-810

PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN SUELOS EXPANSIVOS PROVENIENTE DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA"

UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA- PIURA

TIPO DE MUESTRA: SUELO

TIPO DE EXPLORACIÓN: CALICATA; C-1, C-2

PROFUNDIDAD(m): 0.00 – 1.60

RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 10 -10-2023

ANÁLISIS DE:	SULFATOS (SO ₄)= ASTM D 516 AASHTO T 290 %	SALES SOLUBLES TOTALES MTC E 219 %
TIPO DE EXPLORACIÓN: CALICATA: C-1, C-2 TIPO DE MUESTRA: SUELO PROFUNDIDAD(m): 0.00 – 1.60	0,42	0,66

Lima, 16 de octubre del 2023


CARMEN M. REYES CUBAS
Dra. JEFA (e) DEL LABORATORIO
Laboratorio de Química de la UNI-FIC

El Laboratorio no responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra

Av. Tupac Amaru 210, Código Postal: 15333, Perú
Apartado Postal 1301 Lima 100 - Perú / Telefax: (511) 481 - 9845
Central Telefónica: 481-1070/Anexos: 4020 - 4003

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
Accreditation
Commission



Consultoría, Capacitación, Investigación, Laboratorio y
Proyectos Aplicados a la Geología, Geometalurgia,
Geotecnia y Medio Ambiente.

INFORME DE LABORATORIO

ANÁLISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X APLICADO A MINERALES ARCILLOSOS PARA UNA MUESTRA EN POLVO

PARA:

SR. DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

CSG-022-2024_Rev.0

IL-OTSG-007-2024_Rev.0

Marzo, 2024.

**MSc. José Andrés Yparraguirre
CIP N° 128651
Gerente General**



CONTENIDO

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	3
II. ABREVIATURAS DE LAS ESPECIES MINERALES.....	4
III. ANÁLISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.	5
Muestra Suelo Natural	5
IV. DIFRACTOGRAMAS	6
Figura 01. Difractograma de la Muestra Suelo natural mostrando los minerales identificados.....	6
Figura 02. Difractograma de la Muestra 1 mostrando los minerales arcillosos identificados.	7
V. CRITERIOS EN LA CUANTIFICACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE DRX.....	8
VI. CARACTERÍSTICAS DEL DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X.....	9



I. INTRODUCCIÓN

A solicitud del sr. Diego Andre Sanchez Morote, se ha realizado el Análisis de Difracción de Rayos X (DRX) con Tubo de cobalto aplicado a Minerales arcillosos para una (01) muestra en polvo.

En los Análisis Mineralógicos semicuantitativos por DRX se han determinado todos los minerales presentes (fases cristalinas) con un límite de detección (L.D.) de 1.00 %, obtenido del procedimiento de validación del método. Los silicatos de cobre presentan un bajo nivel de cristalinidad por lo que su evaluación por DRX es limitada.

Las muestras han sido proporcionadas por el cliente para los fines de estudio descritos anteriormente.



II. ABREVIATURAS DE LAS ESPECIES MINERALES

Abreviaturas, nomenclaturas y composición química de las especies minerales mencionadas en el informe.

Nombre	Símbolo	Composición química	Densidad (g/cm ³)	Dureza
Plagioclasas (Albita)	ab	NaAlSi ₃ O ₈	2.62	7.0
Anatasa	ats	TiO ₂	3.9	5.5- 6
Caolinita	kao	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2.60	1.5 - 2.0
Cloritoide	clt	(Fe ²⁺ , Mg,Mn) ₂ Al ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₄	3.54	6.5
Cuarzo	cz	SiO ₂	2.62	7
Cuprita	cup	Cu ₂ O	6.1	3.5-4.0
Clinopiroxeno (Diópsido)	dp	CaMgSi ₂ O ₆	3.4	6.0
Granate (Grosularia)	gsl	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	3.42-3.72	6.5-7.5
Lautita	Lat	CuAsS	4.9	3-3.5
Nontronita	nnt	Na _{0.3} Fe ³⁺ ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ •n(H ₂ O)	2.3	1.5-2
Plagioclasas (Oligoclasa)	olg	(Na, Ca) (Si, Al) ₄ O ₈	2.65	7.0
Moscovita (Sericita)	mus	KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂	2.82	2.0 – 2.5
Silvita	sil	KCl	1.99	2.5
Titanomagnetita	tmg	Fe ²⁺ (Fe ³⁺ , Ti) ₂ O ₄	---	---
Tridimita	trt	SiO ₂	2.3	6.5 - 7

Nota: El termino **trazas (Trz)** se aplica en valores menores a 0.5%.



III. ANÁLISIS MINERALÓGICO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Muestra Suelo Natural

Nombre del mineral	Fórmula general	Resultado Aproximado (%)
Cuarzo	SiO_2	33.5
Moscovita (Sericita)	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	16.3
Cloritoide	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Mn})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	12.3
Plagioclasas (Albita)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	7.6
Nontronita	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$	7.3
Plagioclasas (Oligoclasa)	$(\text{Na}, \text{Ca}) (\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$	5.9
Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5.1
Tridimita	SiO_2	3.9
Clinopiroxeno (Diópsido)	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	3.8
Titanomagnetita	$\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$	1.4
Lautita	CuAsS	< L.D.
Silvita	KCl	< L.D.
Cuprita	Cu_2O	< L.D.
Anatasa	TiO_2	< L.D.
Granate (Grosularia)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	< L.D.

L.D: Limite Detección



IV. DIFRACTOGRAMAS

Figura 01. Difractograma de la Muestra Suelo natural mostrando los minerales identificados.

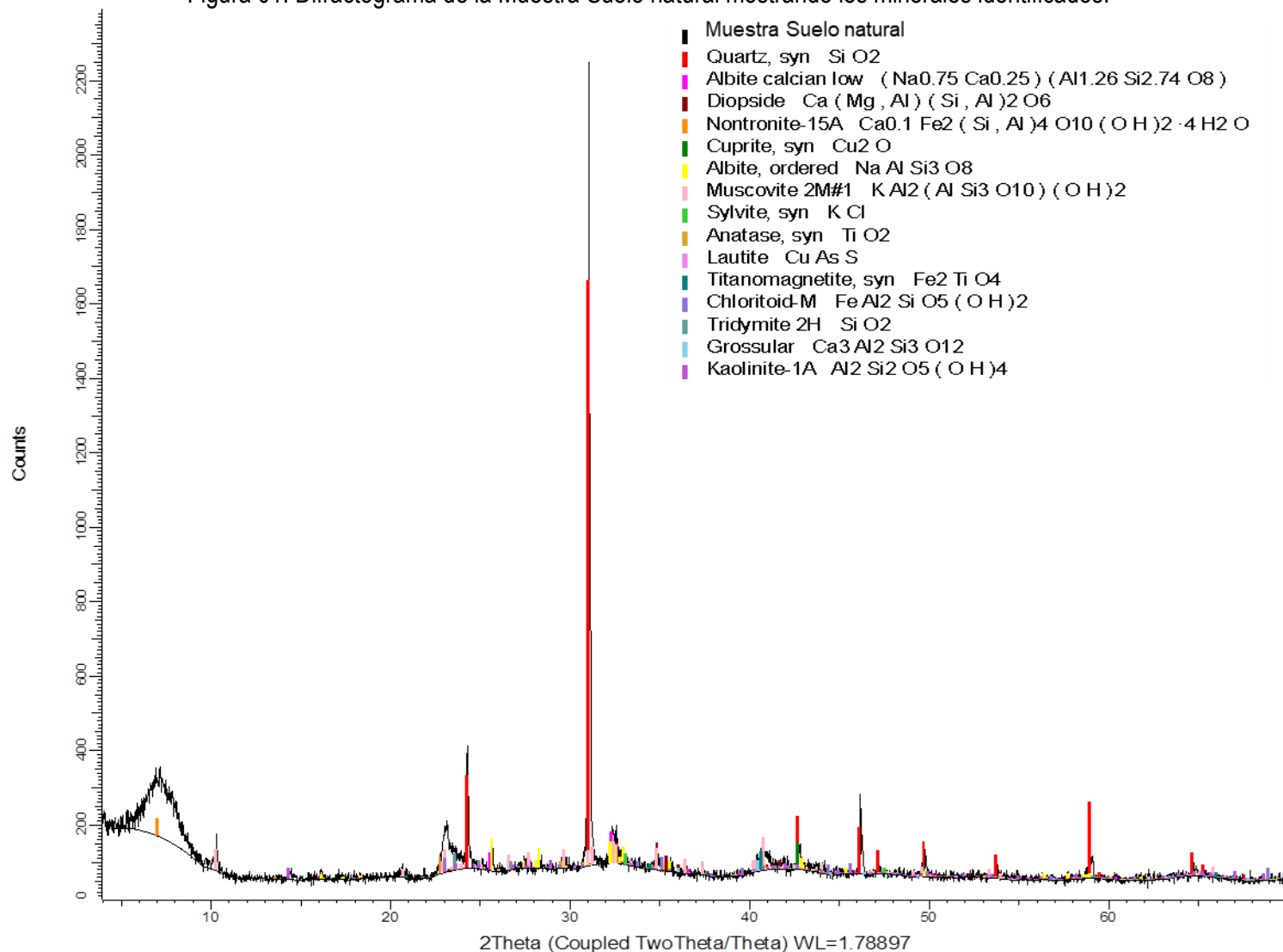
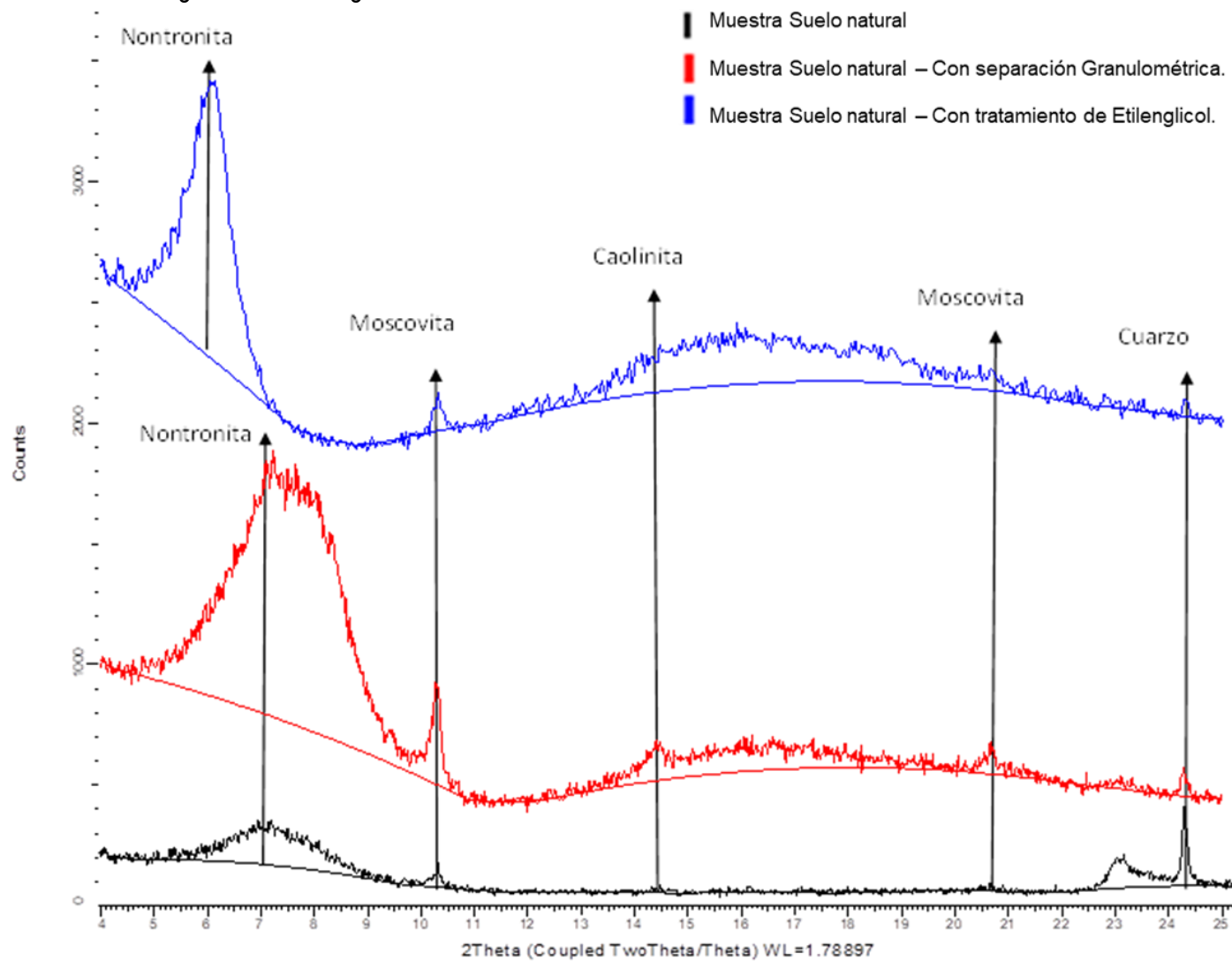




Figura 02. Difractograma de la Muestra 1 mostrando los minerales arcillosos identificados.





V. CRITERIOS EN LA CUANTIFICACIÓN MEDIANTE LA TÉCNICA DE DRX

Las variables de cuantificación R_{exp} , R_{wp} y GOF determinan la validez del refinamiento (método cuantificación).

- Los resultados aproximados han sido redondeados a su menor valor entero, por lo que la sumatoria de los resultados no siempre suma el 100%. Este criterio ha sido definido en el procedimiento de validación del método.
- El valor de aproximación ha sido calculado a partir de los resultados obtenidos en los ensayos para la acreditación.
- El presente informe no puede ser utilizado como certificado.
- Los resultados corresponden a las muestras proporcionadas por el cliente, las cuales han sido entregadas en las instalaciones del laboratorio de MINEMETALLURGY SAC.
- Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de MINEMETALLURGY SAC.
- %: Porcentaje masa relativa (g/g)
- L.D: Límite de Detección.

Criterios de ajuste para el refinamiento

Los criterios de ajuste más utilizados son:

a) El residuo del patrón pesado (R_{wp}).- Este criterio muestra el progreso del refinamiento, ya que el numerador contiene la función residuo que está siendo minimizada durante el refinamiento Rietveld. El residuo del patrón pesado se calcula de la siguiente manera:

$$R_{wp} = \left[\frac{\sum w_i (y_{i(obs)} - y_{i(calc)})^2}{\sum W_i (y_{i(obs)})^2} \right]^{1/2}$$

Dónde:

- $y_i (obs)$ es la intensidad observada en el paso i
- $y_i (calc)$ es la intensidad calculada en el punto i
- W_i es el peso asignado.



b) El valor esperado (R_{exp}).- Dicho criterio refleja la calidad de los datos obtenidos en la medición del patrón de difracción (conteos estadísticos). La fórmula del residuo del valor esperado es:

$$R_{exp} = \left[\frac{(N - P)}{\sum W_i y_{i(obs)}^2} \right]^{1/2}$$

Dónde:

N es el número de datos observados

P el número de parámetros a refinar.

W_i es el peso asignado

$y_i(obs)$ es la intensidad observada en el paso i

c) El ajuste de “bondad” S (goodness of fit).- Si el tiempo de toma de los datos fue suficientemente grande, no dominarán los errores estadísticos, R_{exp} podría ser muy pequeña y la GOF para una estructura cristalina refinada podría ser mayor que 1. Si los datos son obtenidos pobremente, R_{exp} podría ser grande y GOF podría ser menor que 1, el valor de GOF debe estar entre 1 a 1.3. El ajuste de “bondad” se define como;
 S (goodness of fit) = R_{wp}/R_{exp}

Dónde:

R_{wp} es el residuo del patrón pesado; R_{exp} es el residuo del valor esperado.

VI. CARACTERISTICAS DEL DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X

Equipo: DIFRACTÓMETRO D8 Advance

Tubo Co (38kV, 25mA)

KAlfa1: 1.78897 Å

KAlfa2: 1.79285 Å

Filtro: Kbeta: Fe

Detector: LynxEye XE

Rango de medida desde $2\theta = 4^\circ$ hasta $2\theta = 70^\circ$

Identificación: Base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD) PDF-2 - 2014.

Cuantificación: Método Refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database).

Anexo B

Ensayos suelo-cal

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : JUNIO 2023

Muestra : Cal viva

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	99.7
Nº 60	0.250	99.2
Nº 140	0.106	97.9
Nº 200	0.075	97.3

Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	2.7	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	95.9	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	1.4	< 0.002 mm	**

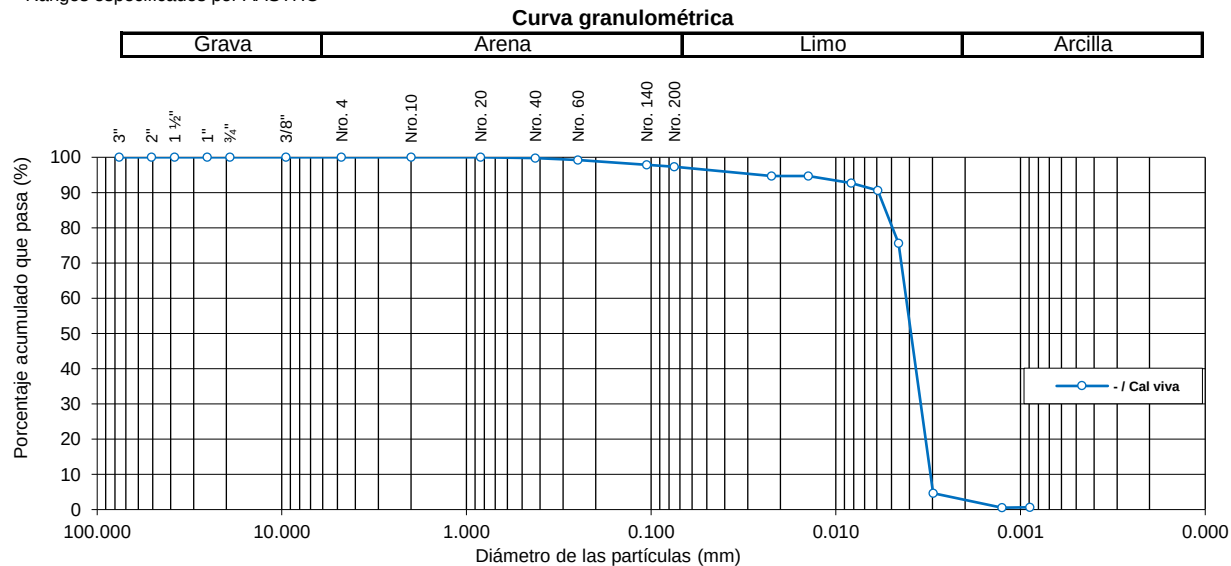
* Rangos especificados por ASTM

** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D2216)	2.90
---	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0223	94.71
0.0141	94.65
0.0083	92.67
0.0059	90.62
0.0046	75.57
0.0030	4.62
0.0013	0.54
0.0009	0.65

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

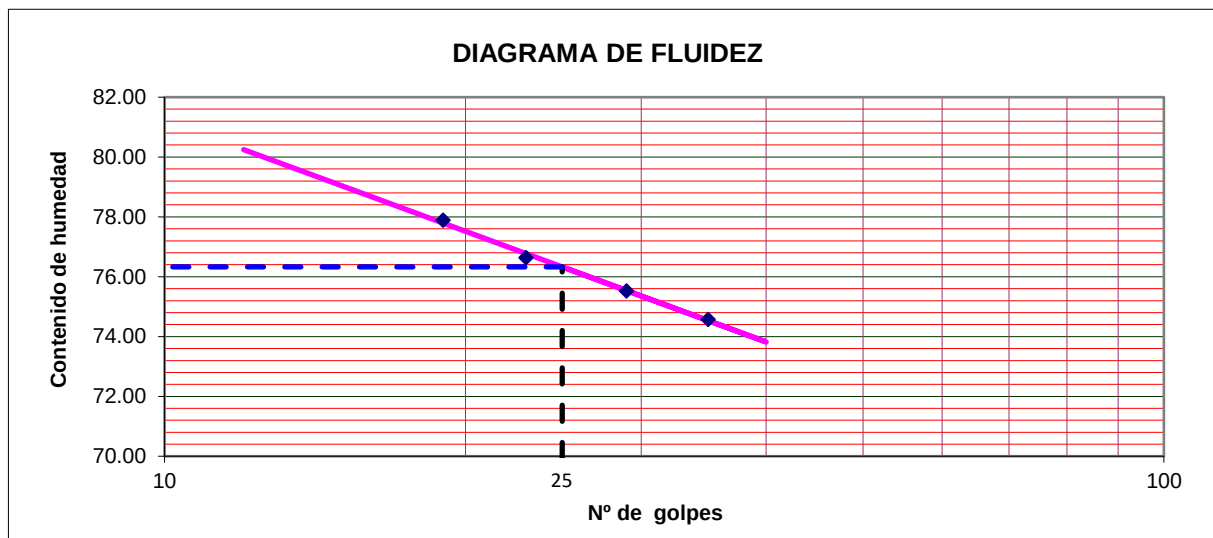
TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 1% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318

MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	76
LÍMITE PLÁSTICO	:	30
ÍNDICE PLÁSTICO	:	46

Elaborado por : *Diego Sanchez*

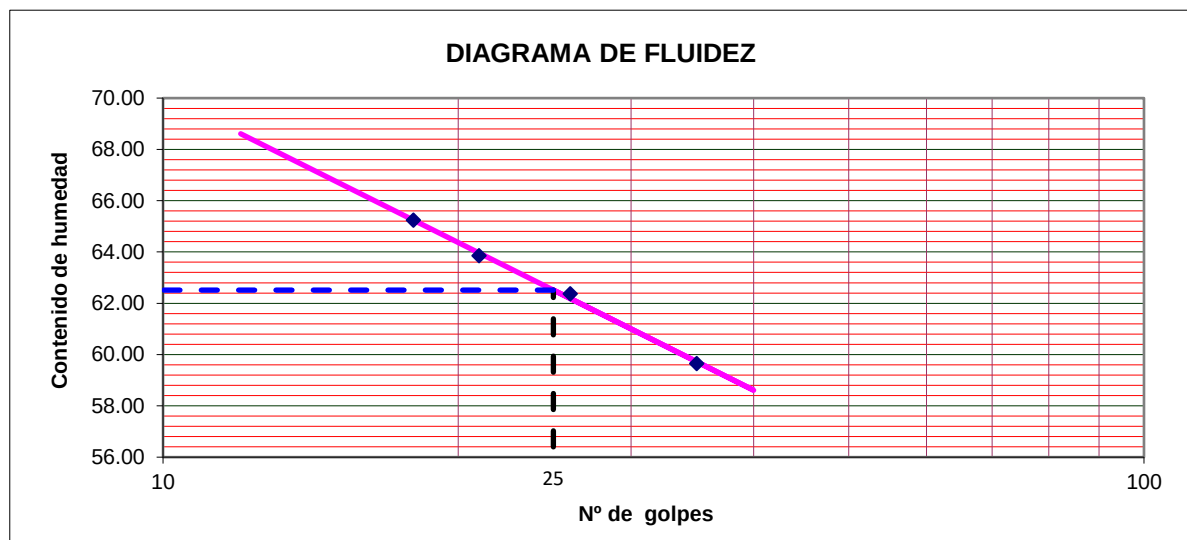
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	63
LÍMITE PLÁSTICO	:	33
ÍNDICE PLÁSTICO	:	30

Elaborado por : *Diego Sanchez*

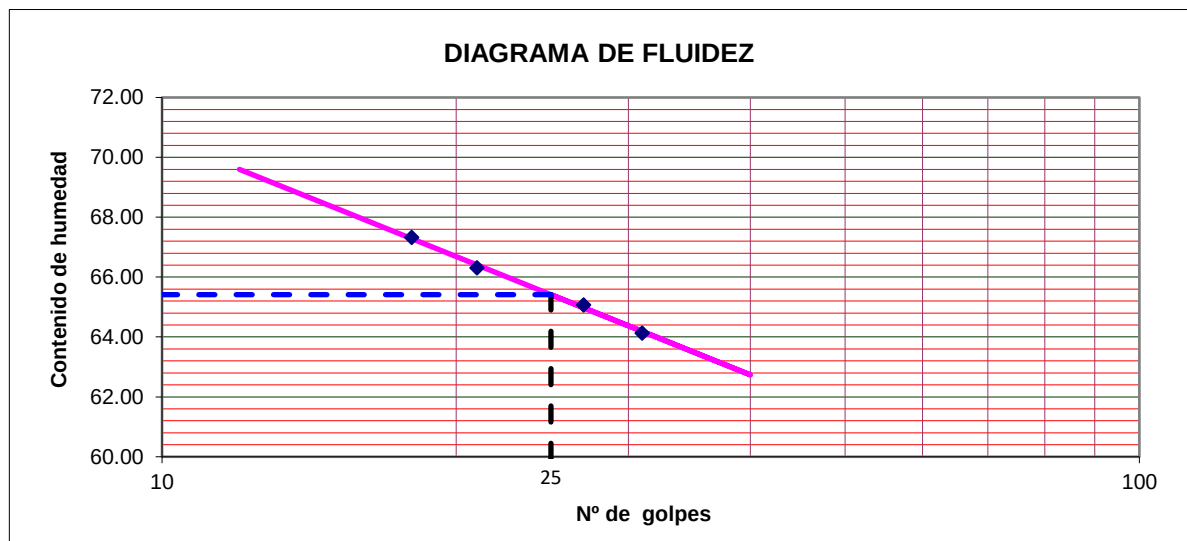
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 3% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	65
LÍMITE PLÁSTICO	:	38
ÍNDICE PLÁSTICO	:	27

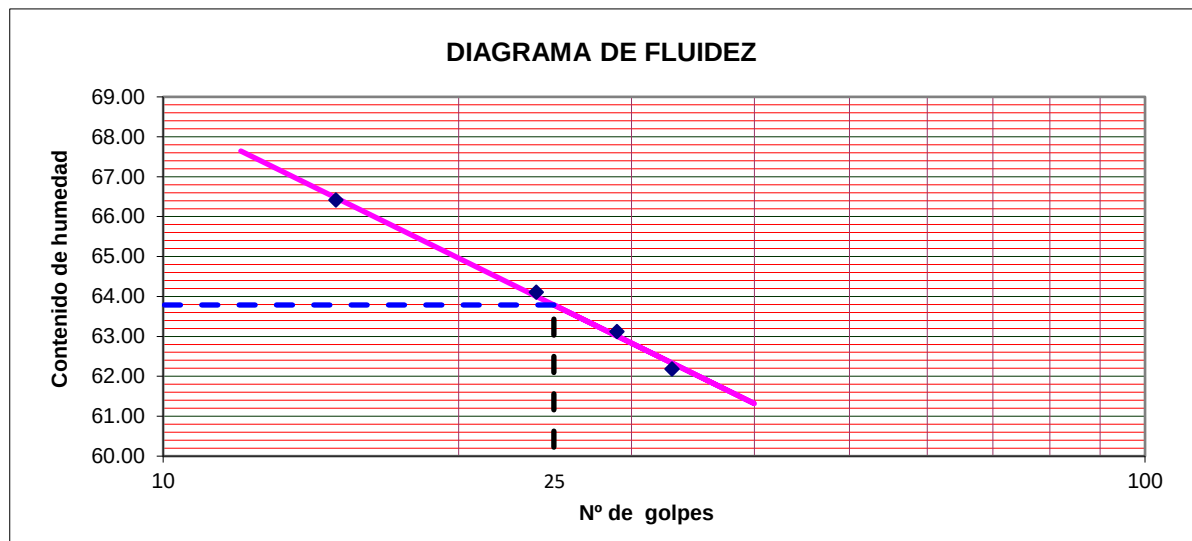
Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 4% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	64
LÍMITE PLÁSTICO	:	40
ÍNDICE PLÁSTICO	:	24

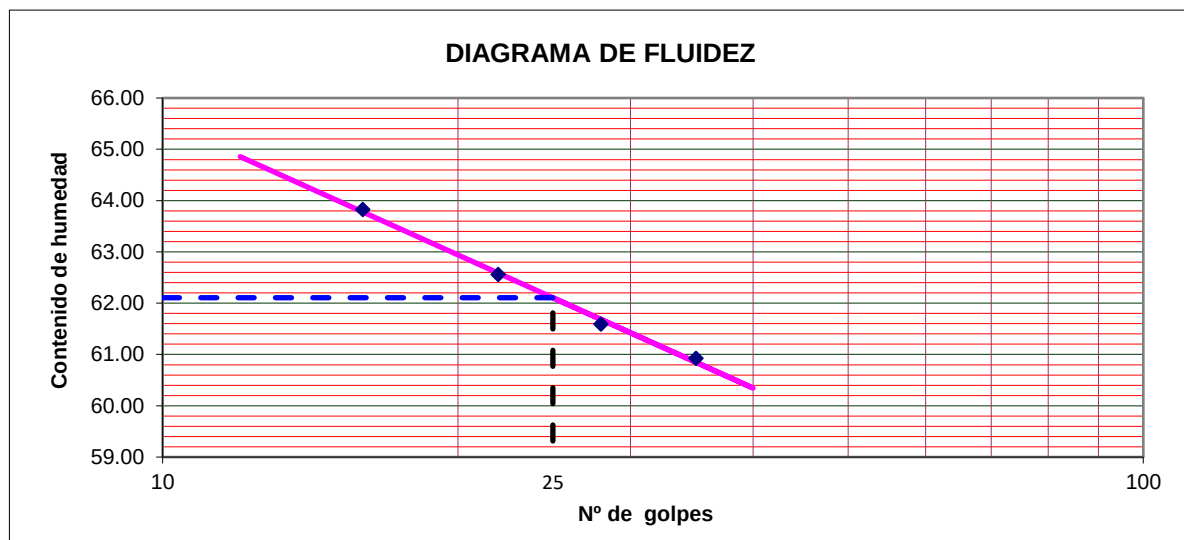
Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	62
LÍMITE PLÁSTICO	:	40
ÍNDICE PLÁSTICO	:	22

Elaborado por : *Diego Sanchez*

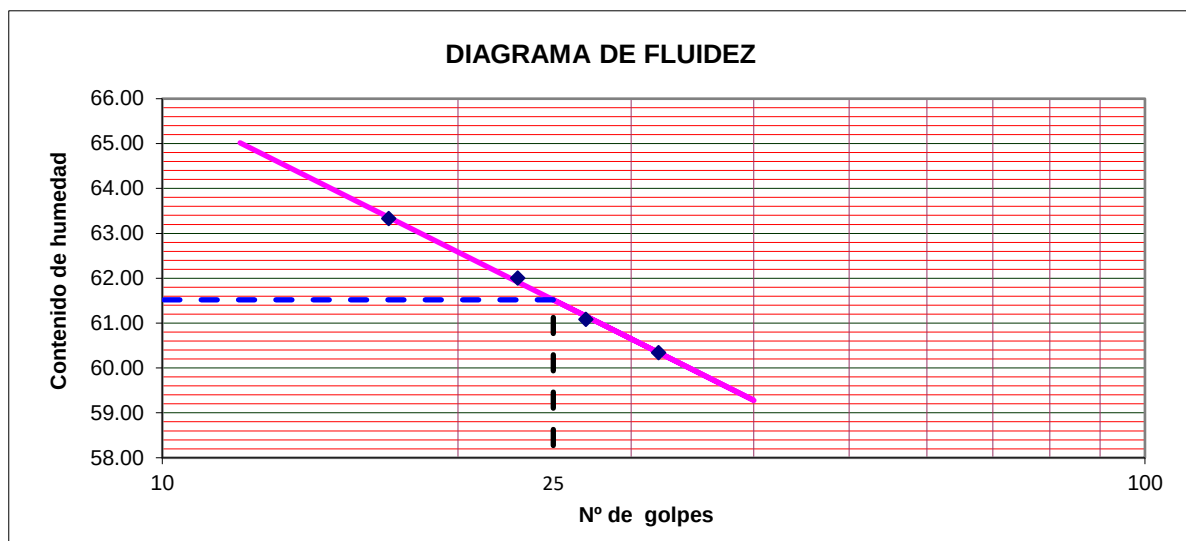
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 6% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	62
LÍMITE PLÁSTICO	:	40
ÍNDICE PLÁSTICO	:	22

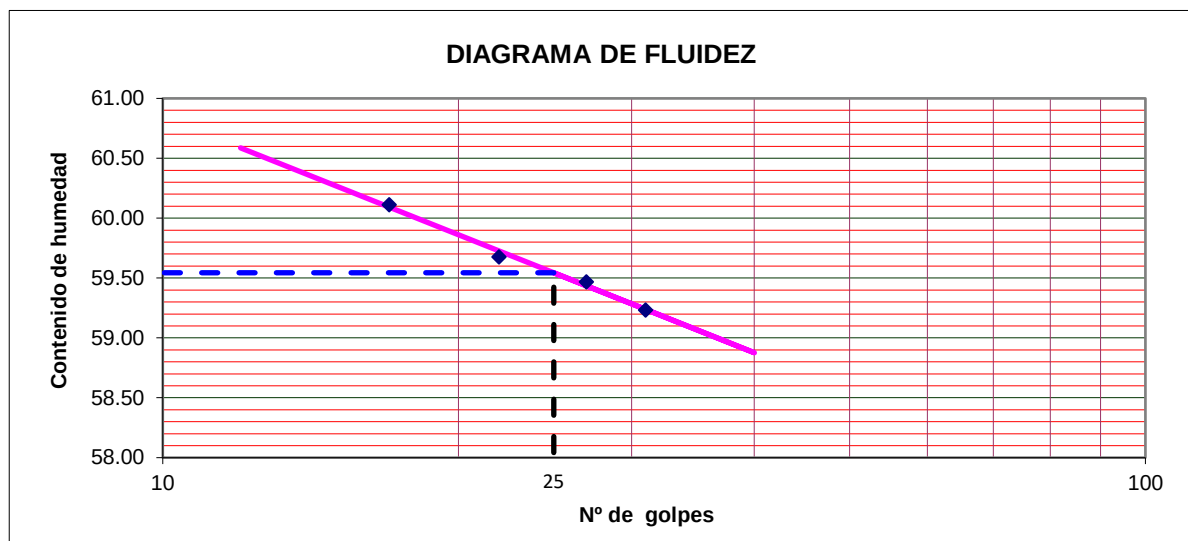
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : JUNIO 2023

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 7% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318 MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 60
LÍMITE PLÁSTICO : 37
ÍNDICE PLÁSTICO : 23

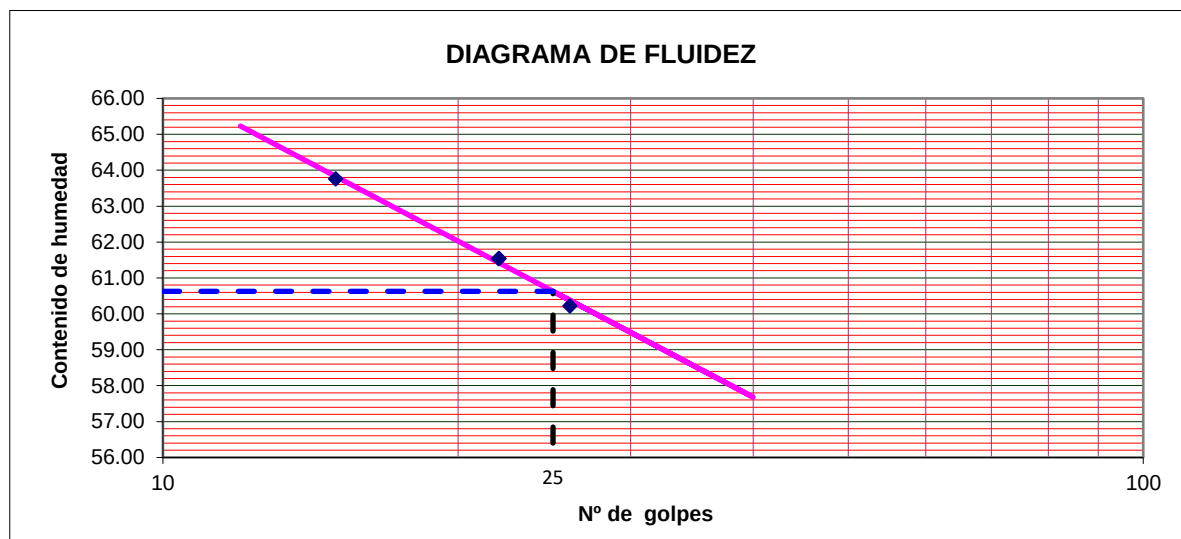
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **JUNIO 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 8% cal

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	61
LÍMITE PLÁSTICO	:	39
ÍNDICE PLÁSTICO	:	22

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
 PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : JULIO 2023

Muestra : Suelo Natural + 4% cal

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	99.9
Nº 140	0.106	99.3
Nº 200	0.075	98.5

Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	1.5	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	47.8	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	50.7	< 0.002 mm	**

* Rangos especificados por ASTM

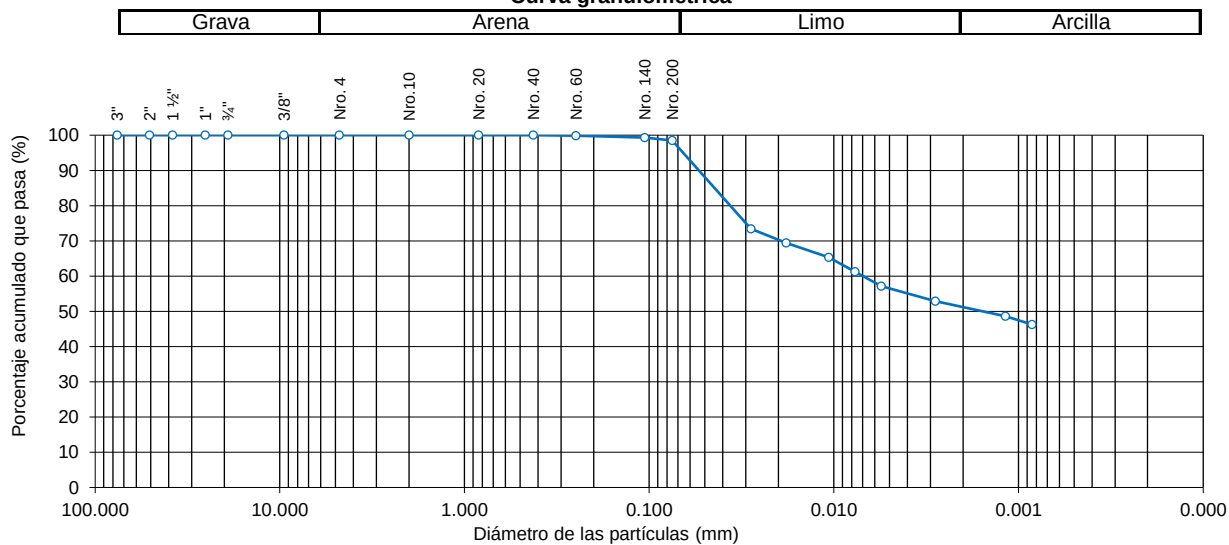
** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D854)	2.64
---	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0281	73.42
0.0181	69.42
0.0107	65.35
0.0077	61.28
0.0055	57.15
0.0028	52.91
0.0012	48.66
0.0008	46.27

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio

Curva granulométrica



Elaborado por : *Diego Sanchez*
 Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **ENERO 2024**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 4% cal

GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVO DE SOLIDOS - REFERENCIA ASTM D854

Método "B"

Gravedad Específica Relativo de Sólidos a Temperatura de Ensayo	:	2.647
Temperatura de Ensayo (°C)	:	30.5
Gravedad Específica Relativo de Sólidos a 20 °C	:	2.639

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

ASTM D4943

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : JULIO 2023

Muestra : Suelo Natural + 4% cal

ESPECIMEN		01
Plato de contracción	N°	LC-2
Masa del plato de contracción	g	21.68
Masa del plato de contracción + suelo humedo	g	50.49
Masa del plato de contracción + suelo seco	g	39.45
Masa de la capa de suelo seco	g	17.77
Contenido de humedad del suelo	%	62.10
Masa de capa de suelo seco + parafina	g	22.12
Masa de capa de suelo seco + parafina, en agua	g	16.07
Masa de agua desplazada de suelo seco + parafina	g	6.05
Densidad del agua	g/cm3	1.00
Volumen de la capa de suelo seco + parafina	cm3	6.05
Masa de la parafina	g	4.35
Densidad de la parafina	g/cm3	0.88
Volumen de la parafina	cm3	4.94
Volumen de suelo seco	cm3	11.13
Límite de Contracción	%	18.81

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR MODIFICADO
ASTM D1557

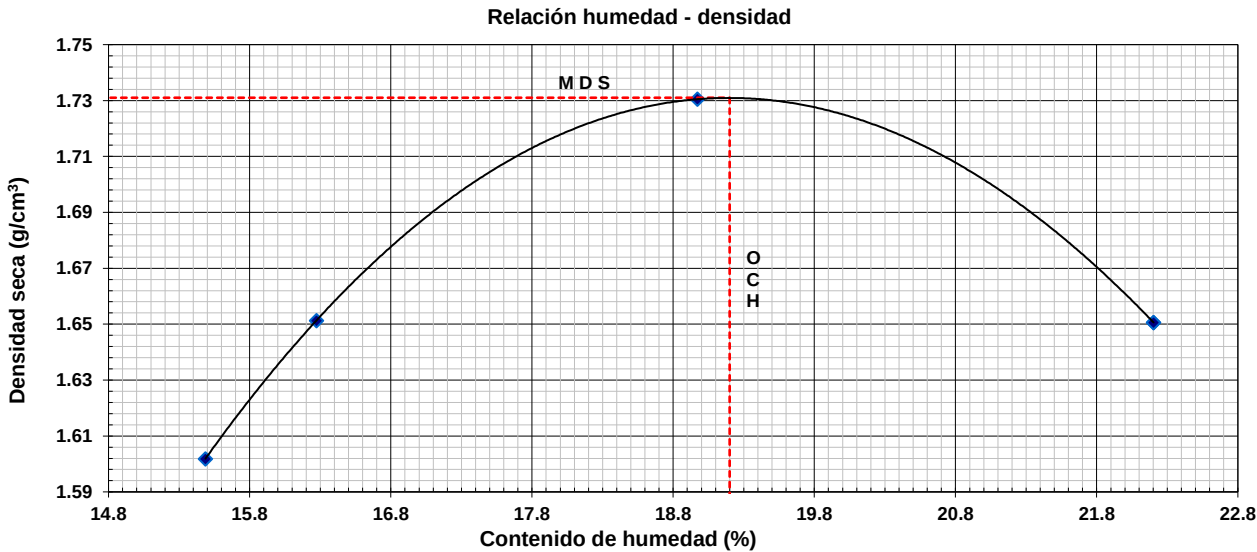
TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : JULIO 2023

Muestra : Suelo Natural + 4% cal

Método de preparación : Seco
Descripción del pisón : Manual

Table with 7 columns: Test Name, Unit, and four columns of numerical data representing different samples.

Table with 4 columns: Property (Máxima Densidad Seca, Óptimo Contenido de Humedad), Symbol (M.D.S., O.C.H.), Value (1.731, 19.20), and Unit (g/cm³, %).



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : JULIO 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo natural + 4% cal

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	33.20
Altura	: mm	66.40
Area	: mm ²	865.70
Densidad Humeda	: gr/cm ³	2.06
Densidad seca	: gr/cm ³	1.70
Contenido de Humedad	: %	20.92
L/D	:	2.00
Peso Relativo de Sólidos	:	2.639
Grado de Saturacion	: %	100.75

Parámetros de Resistencia

Carga última (kPa)	:	447.46
Cohesión (kPa)	:	223.73
Cohesión (kg/cm ²)	:	2.28

Nota :

El espécimen fue remoldeado al 99% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

JULIO 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado

:

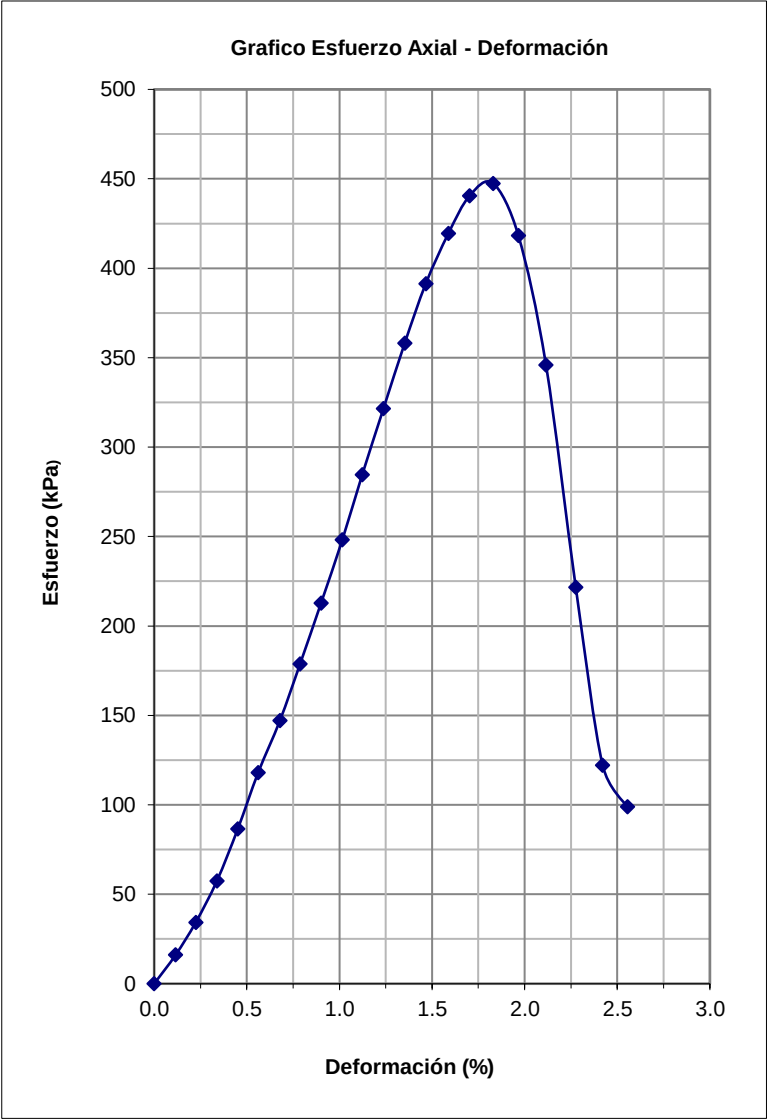
Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)

Muestra

:

Suelo natural + 4% cal

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)		:	33.20
Área Inicial (mm²)		:	865.70
Altura Inicial (mm)		:	66.40
Deformacion	Area	Fuerza	Esfuerzo
%	Corregida	Axial	
	mm²	(Newton)	(kPa)
0.00	0.0	0.0	0.0
0.12	866.7	14.0	16.1
0.22	867.6	29.8	34.3
0.34	868.6	49.8	57.5
0.45	869.6	75.1	86.6
0.56	870.6	102.2	118.0
0.68	871.6	127.5	147.1
0.79	872.6	154.9	178.8
0.90	873.6	184.3	212.7
1.02	874.6	214.9	248.1
1.12	875.5	246.5	284.5
1.24	876.5	278.5	321.5
1.35	877.6	310.2	358.2
1.47	878.6	339.0	391.4
1.59	879.7	363.3	419.5
1.70	880.7	381.6	440.6
1.83	881.8	387.6	447.5
1.97	883.1	362.3	418.3
2.12	884.4	299.6	345.9
2.28	885.9	192.1	221.7
2.42	887.2	105.8	122.1
2.55	888.4	85.8	98.9



Nota :

El espécimen fue remoldeado al 99% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

JULIO 2023

ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D4546)

Estado

:

Remoldeado (material < Tamiz N°4)

Muestra

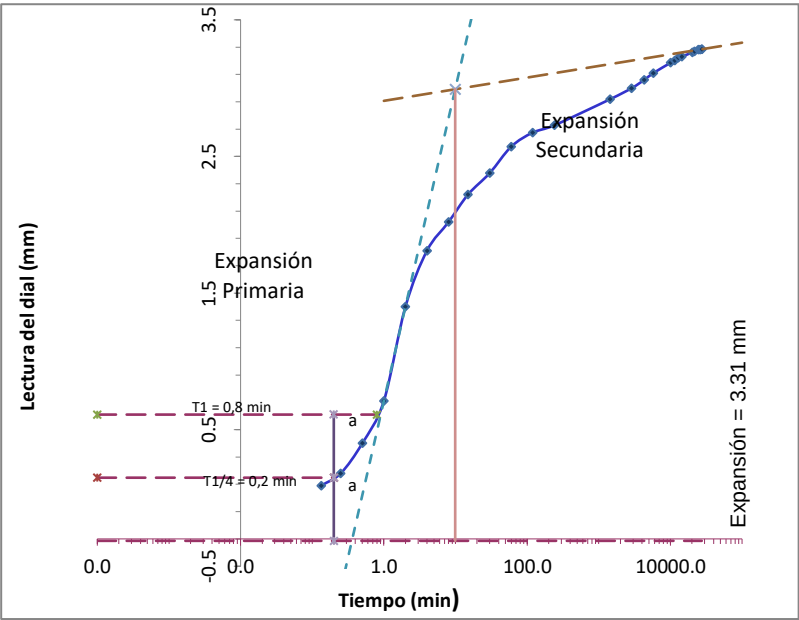
:

Suelo natural + 4% cal

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	61.8	61.8
Altura(mm)	20.0	23.3
Densidad Seca (gr/cm3)	1.71	1.47
Densidad Húmeda (gr/cm3)	1.88	1.90
Húmedad (%)	10.00	29.26
Saturación (%)	48.8	97.3
Gravedad de solidos (Gs)	2.64	2.64
Relación de vacios (e)	0.541	0.794

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.090	0.45
0.25	0.180	0.90
0.5	0.400	2.00
1	0.710	3.54
2	1.400	6.99
4	1.810	9.03
8	2.020	10.08
15	2.222	11.09
30	2.378	11.87
60	2.572	12.83
120	2.675	13.35
240	2.728	13.61
1440	2.919	14.57
2880	3.000	14.97
4320	3.061	15.27
5760	3.110	15.52
10080	3.186	15.90
11520	3.203	15.98
12960	3.223	16.08
14400	3.230	16.12
20160	3.262	16.28
21600	3.269	16.31
24480	3.281	16.37
25920	3.283	16.38
27360	3.285	16.39



EXPANSIÓN LIBRE (%) : 16.50

Nota:
El espécimen fue remoldeado al 99% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : AGOSTO 2023

Muestra : Suelo Natural + 5% cal

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	99.8
Nº 140	0.106	98.7
Nº 200	0.075	97.6

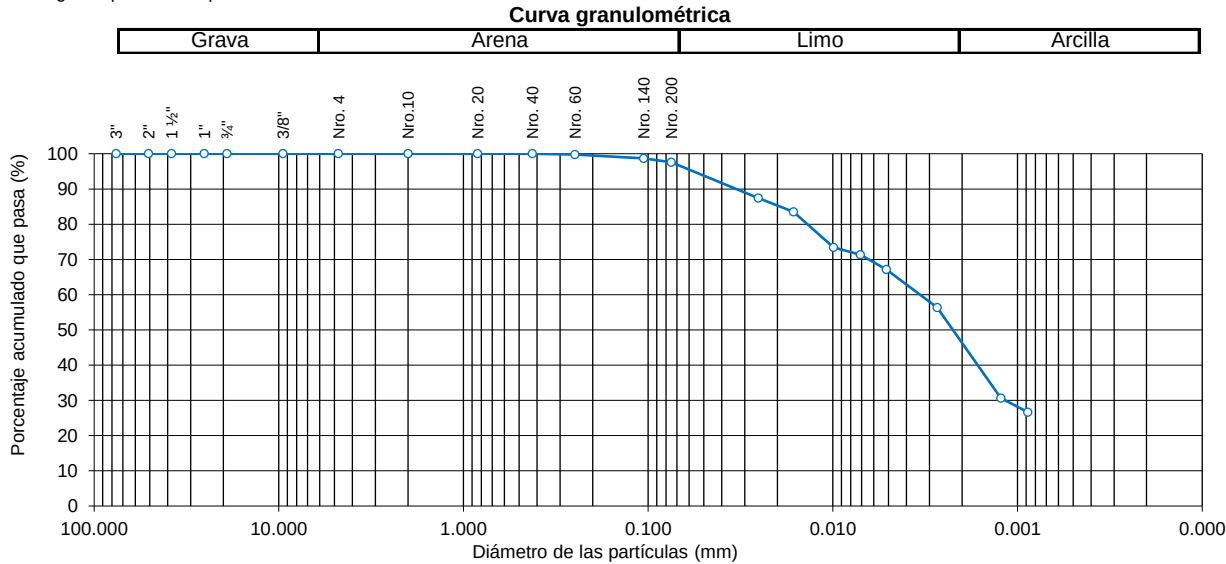
Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	2.4	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	55.7	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	41.9	< 0.002 mm	**

* Rangos especificados por ASTM
** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D854)	2.68
--	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0253	87.44
0.0163	83.46
0.0099	73.47
0.0071	71.33
0.0051	67.11
0.0027	56.34
0.0012	30.61
0.0009	26.68

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **ENERO 2024**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5% cal

GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVO DE SOLIDOS - REFERENCIA ASTM D854

Método "B"

Gravedad Específica Relativo de Sólidos a Temperatura de Ensayo	:	2.685
Temperatura de Ensayo (°C)	:	30.5
Gravedad Específica Relativo de Sólidos a 20 °C	:	2.678

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

ASTM D4943

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : AGOSTO 2023

Muestra : Suelo Natural + 5% cal

ESPECIMEN	01
Plato de contracción	N° LC-3
Masa del plato de contracción	g 22.59
Masa del plato de contracción + suelo humedo	g 53.61
Masa del plato de contracción + suelo seco	g 41.57
Masa de la capa de suelo seco	g 18.98
Contenido de humedad del suelo	% 63.44
Masa de capa de suelo seco + parafina	g 22.84
Masa de capa de suelo seco + parafina, en agua	g 15.85
Masa de agua desplazada de suelo seco + parafina	g 6.99
Densidad del agua	g/cm3 1.00
Volumen de la capa de suelo seco + parafina	cm3 6.99
Masa de la parafina	g 3.86
Densidad de la parafina	g/cm3 0.88
Volumen de la parafina	cm3 4.39
Volumen de suelo seco	cm3 11.46
Límite de Contracción	% 20.46

Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR MODIFICADO

ASTM D1557

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : AGOSTO 2023

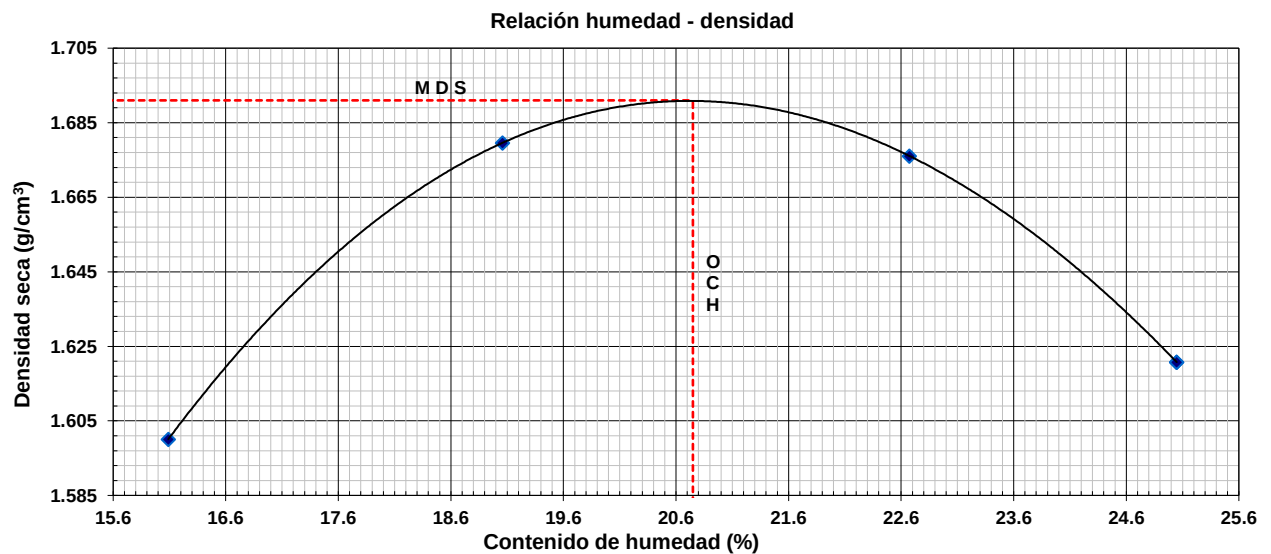
Muestra : Suelo Natural + 5% cal

Método de preparación : Seco

Descripción del pisón : Manual

Peso suelo compactado + molde	(g)	5884.50	6018.50	6071.60	6043.90	
Peso molde	(g)	4134.60	4134.60	4134.60	4134.60	
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1749.90	1883.90	1937.00	1909.30	
Volumen del molde	(cm ³)	942.07	942.07	942.07	942.07	
Densidad húmeda	(g/cm ³)	1.858	2.000	2.056	2.027	
Peso muestra húmeda + tara	(g)	360.20	220.90	316.30	256.90	
Peso muestra seca + tara	(g)	327.70	205.90	281.70	230.90	
Peso de tara	(g)	125.70	127.20	129.10	127.10	
Peso de agua	(g)	32.50	15.00	34.60	26.00	
Peso de la muestra seca	(g)	202.00	78.70	152.60	103.80	
Contenido de humedad	(%)	16.09	19.06	22.67	25.05	
Densidad seca	(g/cm ³)	1.600	1.680	1.676	1.621	

Máxima Densidad Seca	M.D.S.	1.691	g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	O.C.H.	20.75	%



Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : AGOSTO 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo natural + 5% cal

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	33.71
Altura	: mm	69.80
Area	: mm ²	892.50
Densidad Humeda	: gr/cm ³	2.04
Densidad seca	: gr/cm ³	1.65
Contenido de Humedad	: %	23.30
L/D	:	2.07
Peso Relativo de Sólidos	:	2.678
Grado de Saturacion	: %	100.69

Parámetros de Resistencia

Carga última (kPa)	:	547.03
Cohesión (kPa)	:	273.51
Cohesión (kg/cm ²)	:	2.79

Nota :

El espécimen fue remoldeado al 98% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

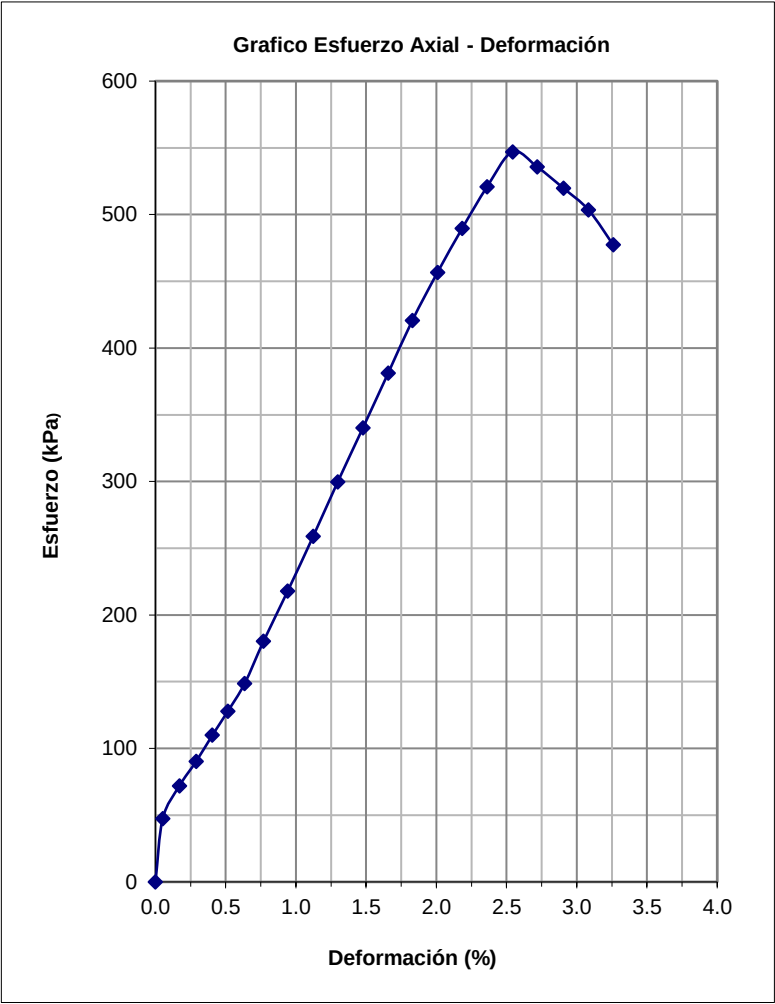
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
 PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : AGOSTO 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
 Muestra : Suelo natural + 5% cal

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)		:	33.71
Área Inicial (mm²)		:	892.50
Altura Inicial (mm)		:	69.80
Deformacion	Area Corregida	Fuerza Axial	Esfuerzo
%	mm²	(Newton)	(kPa)
0.00	0.0	0.0	0.0
0.05	893.0	42.5	47.3
0.17	894.0	64.4	71.9
0.29	895.1	81.0	90.4
0.41	896.1	98.4	109.9
0.52	897.1	114.4	127.8
0.63	898.2	132.9	148.6
0.77	899.4	161.2	180.3
0.94	901.0	194.9	218.0
1.12	902.6	231.5	259.0
1.30	904.2	267.8	299.7
1.48	905.9	303.9	340.1
1.66	907.5	340.6	381.2
1.83	909.1	375.8	420.7
2.01	910.8	407.9	456.6
2.18	912.4	437.4	489.6
2.36	914.1	465.3	520.9
2.54	915.8	488.6	547.0
2.72	917.4	478.5	535.7
2.90	919.2	464.3	519.8
3.08	920.9	449.8	503.5
3.26	922.6	426.4	477.3



Nota :
 El espécimen fue remoldeado al 98% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
 Elaborado por : Diego Sanchez
 Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

AGOSTO 2023

ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D4546)

Estado

:

Remoldeado (material < Tamiz N°4)

Muestra

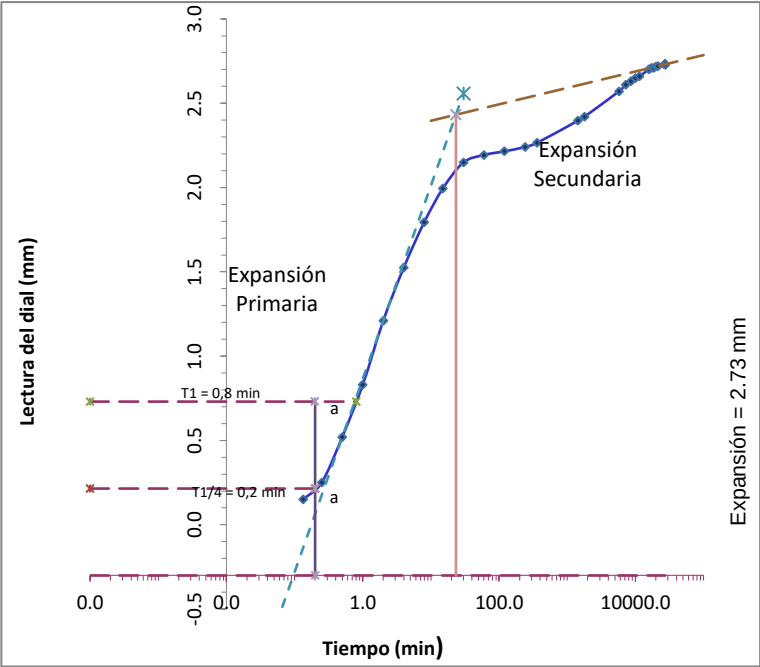
:

Suelo natural + 5% cal

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	61.7	61.7
Altura(mm)	20.1	22.8
Densidad Seca (gr/cm3)	1.66	1.46
Densidad Húmeda (gr/cm3)	1.83	1.91
Húmedad (%)	10.03	31.01
Saturación (%)	43.7	99.6
Gravedad de solidos (Gs)	2.68	2.68
Relación de vacios (e)	0.614	0.834

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.150	0.75
0.25	0.250	1.25
0.5	0.520	2.59
1	0.830	4.14
2	1.210	6.03
4	1.525	7.61
8	1.795	8.95
15	1.995	9.95
30	2.149	10.72
60	2.193	10.94
120	2.215	11.05
240	2.240	11.17
360	2.265	11.30
1440	2.397	11.96
1800	2.421	12.07
5760	2.571	12.82
7200	2.610	13.02
8640	2.630	13.12
10080	2.650	13.22
11520	2.660	13.27
15840	2.702	13.48
17280	2.709	13.51
18720	2.710	13.52
20160	2.719	13.56
21600	2.721	13.57
27360	2.731	13.62



EXPANSIÓN LIBRE (%) : 13.63

Nota:
El espécimen fue remoldeado al 98% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : OCTUBRE 2023

Muestra : Suelo Natural + 7% cal

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	99.6
Nº 140	0.106	97.0
Nº 200	0.075	95.6

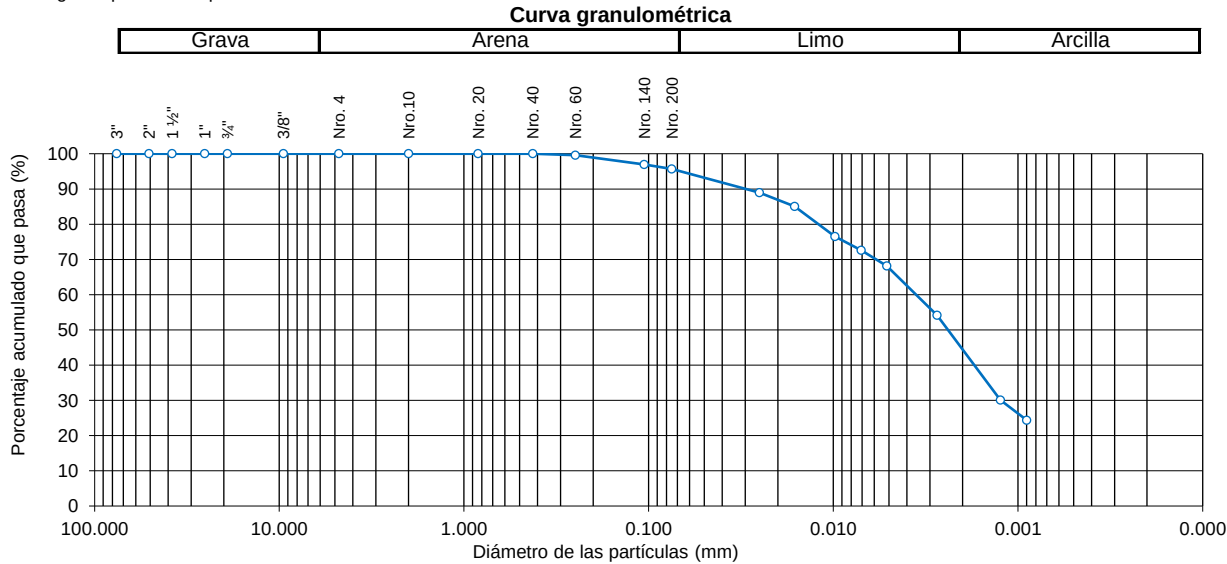
Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	4.4	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	55.1	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	40.5	< 0.002 mm	**

* Rangos especificados por ASTM
** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D854)	2.65
--	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0251	88.95
0.0162	85.03
0.0098	76.54
0.0071	72.57
0.0051	68.14
0.0027	54.20
0.0012	30.12
0.0009	24.38

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **OCTUBRE 2023**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 7% cal

GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVO DE SOLIDOS - REFERENCIA ASTM D854

Método "B"

Gravedad Específica Relativo de Sólidos a Temperatura de Ensayo	:	2.647
Temperatura de Ensayo (°C)	:	23.1
Gravedad Específica Relativo de Sólidos a 20 °C	:	2.645

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

ASTM D4943

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : OCTUBRE 2023

Muestra : Suelo Natural + 7%cal

ESPECIMEN		01
Plato de contracción	Nº	LC-04
Masa del plato de contracción	g	22.38
Masa del plato de contracción + suelo humedo	g	54.94
Masa del plato de contracción + suelo seco	g	42.95
Masa de la capa de suelo seco	g	20.57
Contenido de humedad del suelo	%	58.29
Masa de capa de suelo seco + parafina	g	24.89
Masa de capa de suelo seco + parafina, en agua	g	17.80
Masa de agua desplazada de suelo seco + parafina	g	7.09
Densidad del agua	g/cm3	1.00
Volumen de la capa de suelo seco + parafina	cm3	7.09
Masa de la parafina	g	4.32
Densidad de la parafina	g/cm3	0.88
Volumen de la parafina	cm3	4.91
Volumen de suelo seco	cm3	12.89
Límite de Contracción	%	21.49

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR MODIFICADO

ASTM D1557

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : OCTUBRE 2023

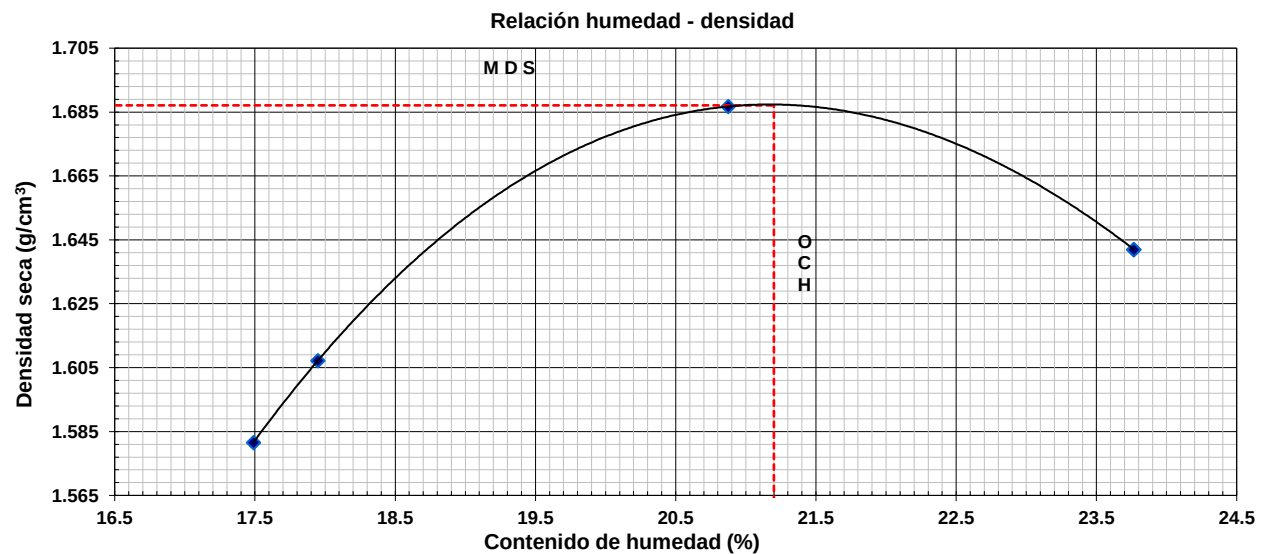
Muestra : Suelo Natural + 7% cal

Método de preparación : Seco

Descripción del pisón : Manual

Peso suelo compactado + molde	(g)	5885.00	5920.30	6055.20	6049.00	
Peso molde	(g)	4134.00	4134.00	4134.00	4134.00	
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1751.00	1786.30	1921.20	1915.00	
Volumen del molde	(cm ³)	942.30	942.30	942.30	942.30	
Densidad húmeda	(g/cm ³)	1.858	1.896	2.039	2.032	
Peso muestra húmeda + tara	(g)	277.30	221.40	229.60	358.60	
Peso muestra seca + tara	(g)	261.00	207.40	212.40	329.20	
Peso de tara	(g)	167.80	129.40	130.00	205.50	
Peso de agua	(g)	16.30	14.00	17.20	29.40	
Peso de la muestra seca	(g)	93.20	78.00	82.40	123.70	
Contenido de humedad	(%)	17.49	17.95	20.87	23.77	
Densidad seca	(g/cm ³)	1.582	1.607	1.687	1.642	

Máxima Densidad Seca	M.D.S.	1.687	g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	O.C.H.	21.20	%



Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **OCTUBRE 2023**

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 7% cal

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	33.78
Altura	: mm	69.42
Area	: mm ²	895.94
Densidad Humeda	: gr/cm ³	2.02
Densidad seca	: gr/cm ³	1.64
Contenido de Humedad	: %	23.24
L/D	:	2.06
Peso Relativo de Sólidos	:	2.645
Grado de Saturacion	: %	100.29

Parámetros de Resistencia

Carga última (kPa)	:	686.56
Cohesión (kPa)	:	343.28
Cohesión (kg/cm ²)	:	3.50

Nota :

El espécimen fue remoldeado al 98% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

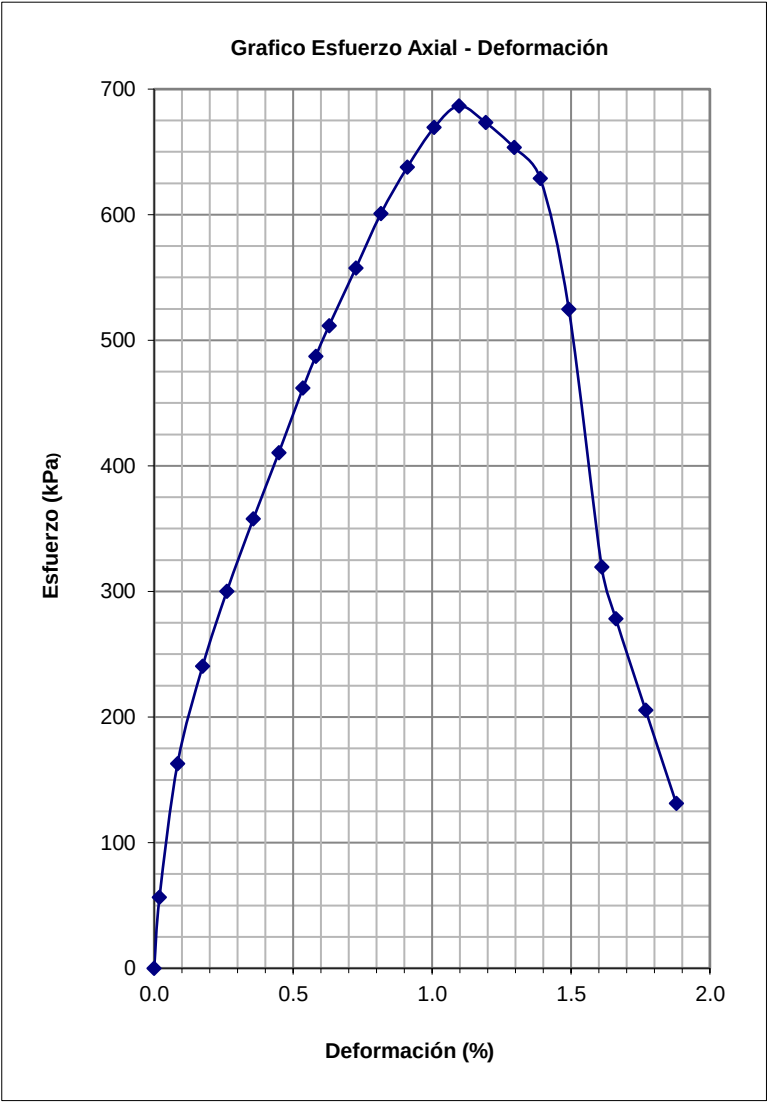
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **OCTUBRE 2023**

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 7% cal

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)		:	33.78
Área Inicial (mm²)		:	895.94
Altura Inicial (mm)		:	69.42
Deformacion	Area	Fuerza	Esfuerzo
%	Corregida	Axial	(kPa)
	mm²	(Newton)	
0.00	0.0	0.0	0.0
0.02	896.1	48.7	56.3
0.08	896.7	144.2	163.0
0.17	897.5	213.5	240.4
0.26	898.3	267.0	300.3
0.36	899.1	318.4	357.7
0.45	900.0	365.5	410.4
0.54	900.8	411.7	461.9
0.58	901.2	434.4	487.3
0.63	901.6	456.2	511.7
0.73	902.5	497.2	557.4
0.82	903.3	536.0	600.8
0.91	904.2	569.1	637.8
1.01	905.1	597.4	669.4
1.10	905.9	612.7	686.6
1.19	906.8	600.9	673.3
1.30	907.7	583.1	653.5
1.39	908.6	561.0	628.8
1.49	909.5	467.9	524.7
1.61	910.6	284.2	319.5
1.66	911.1	247.5	278.4
1.77	912.1	182.1	205.3
1.88	913.1	115.7	131.2



Nota :
El espécimen fue remoldeado al 98% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **OCTUBRE 2023**

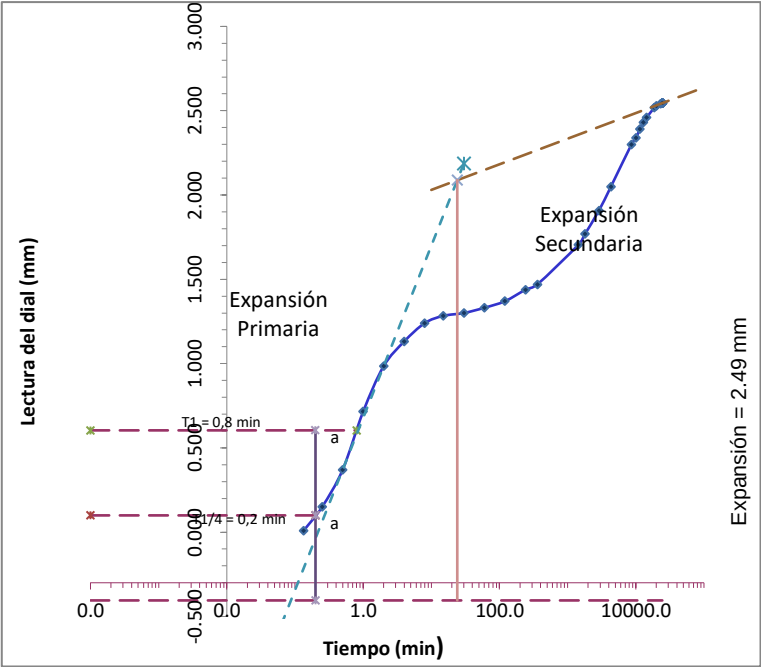
ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D4546)

Estado : Remoldeado (material < Tamiz N°4)
Muestra : Suelo Natural + 7% cal

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	61.8	61.8
Altura(mm)	20.0	22.6
Densidad Seca (gr/cm3)	1.65	1.46
Densidad Húmeda (gr/cm3)	1.78	1.90
Húmedad (%)	8.47	30.10
Saturación (%)	36.9	98.1
Gravedad de solidos (Gs)	2.65	2.65
Relación de vacios (e)	0.607	0.812

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.008	0.04
0.25	0.150	0.75
0.5	0.370	1.85
1	0.715	3.57
2	0.985	4.92
4	1.131	5.64
8	1.240	6.19
15	1.283	6.40
30	1.300	6.49
60	1.331	6.64
120	1.370	6.84
240	1.438	7.18
360	1.470	7.34
1440	1.705	8.51
1800	1.769	8.83
2880	1.908	9.52
4320	2.050	10.23
8640	2.300	11.48
10080	2.340	11.68
11520	2.392	11.94
12960	2.430	12.13
14400	2.459	12.27
18720	2.518	12.56
20160	2.529	12.62
23040	2.541	12.68
24480	2.545	12.70



EXPANSIÓN LIBRE (%) : **12.44**

Nota:
 El espécimen fue remoldeado al 98% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
 Elaborado por : *Diego Sanchez*
 Revisado por : *Ing. César Atala*

Anexo C

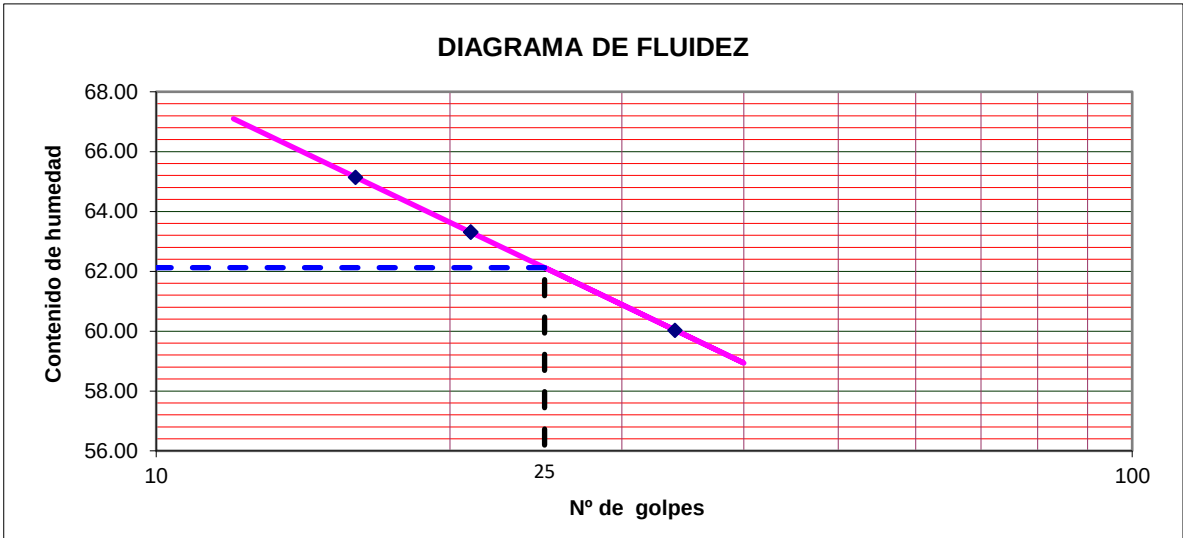
Ensayos suelo-cemento

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : NOVIEMBRE 2023

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 1% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 62
LÍMITE PLÁSTICO : 37
ÍNDICE PLÁSTICO : 25

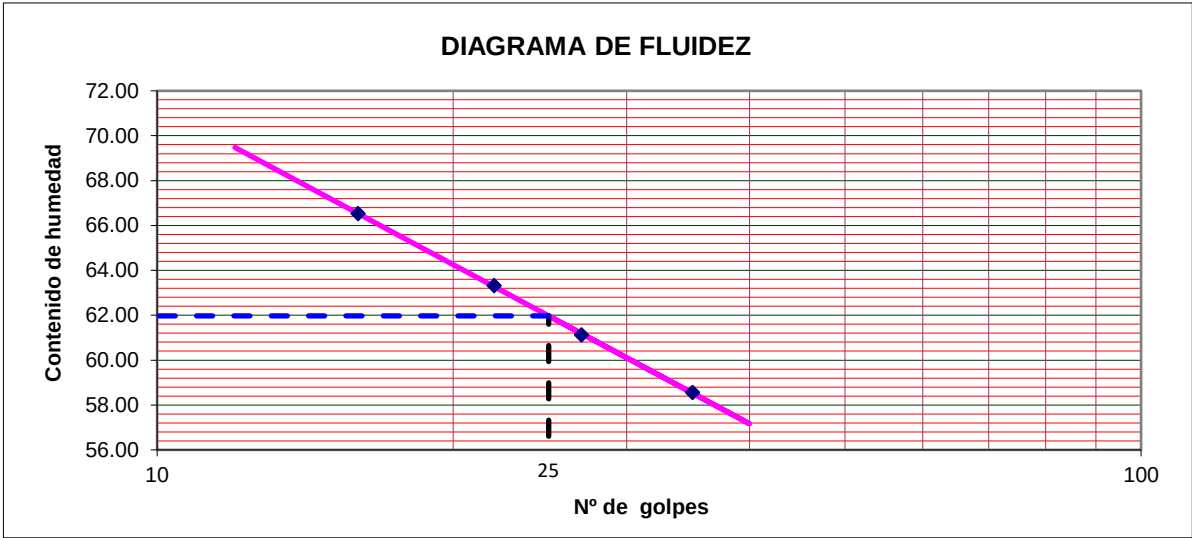
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : NOVIEMBRE 2023

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 2% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 62
LÍMITE PLÁSTICO : 39
ÍNDICE PLÁSTICO : 23

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

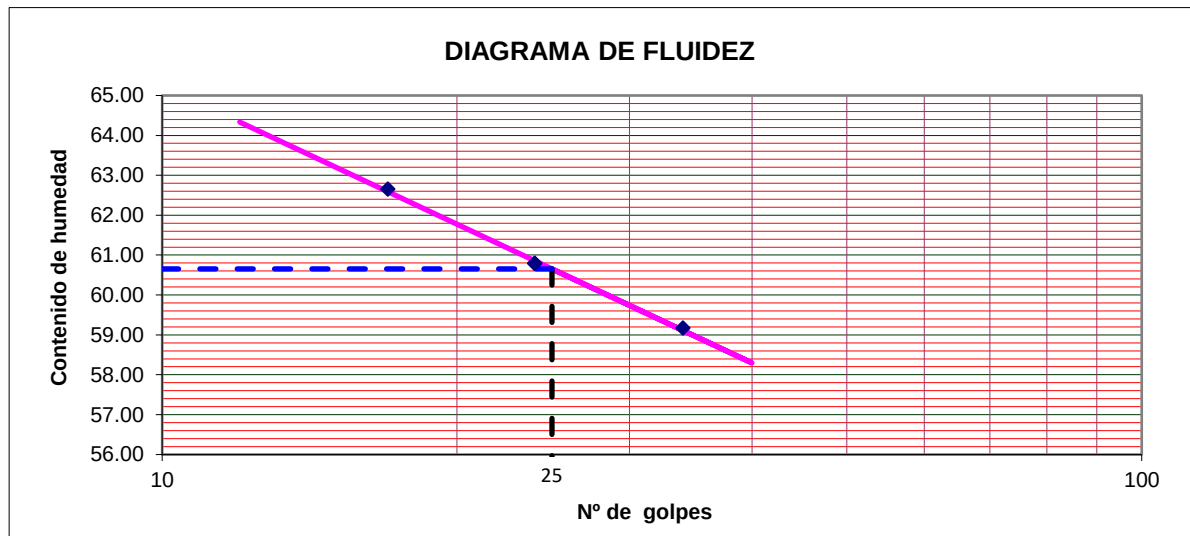
TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 3% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318

MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	61
LÍMITE PLÁSTICO	:	38
ÍNDICE PLÁSTICO	:	23

Elaborado por : *Diego Sanchez*

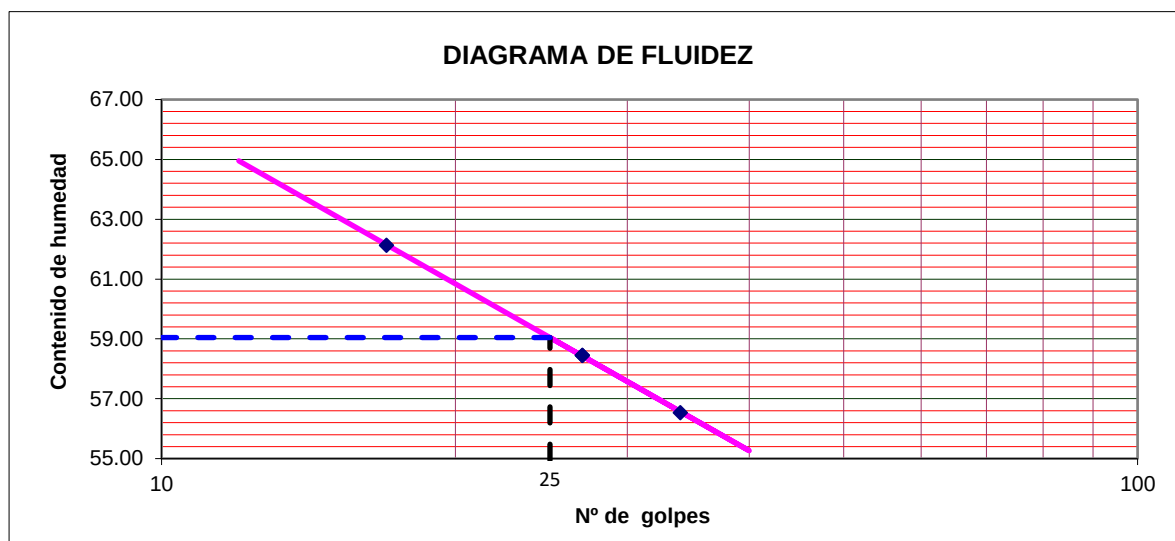
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 4% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	59
LÍMITE PLÁSTICO	:	40
ÍNDICE PLÁSTICO	:	19

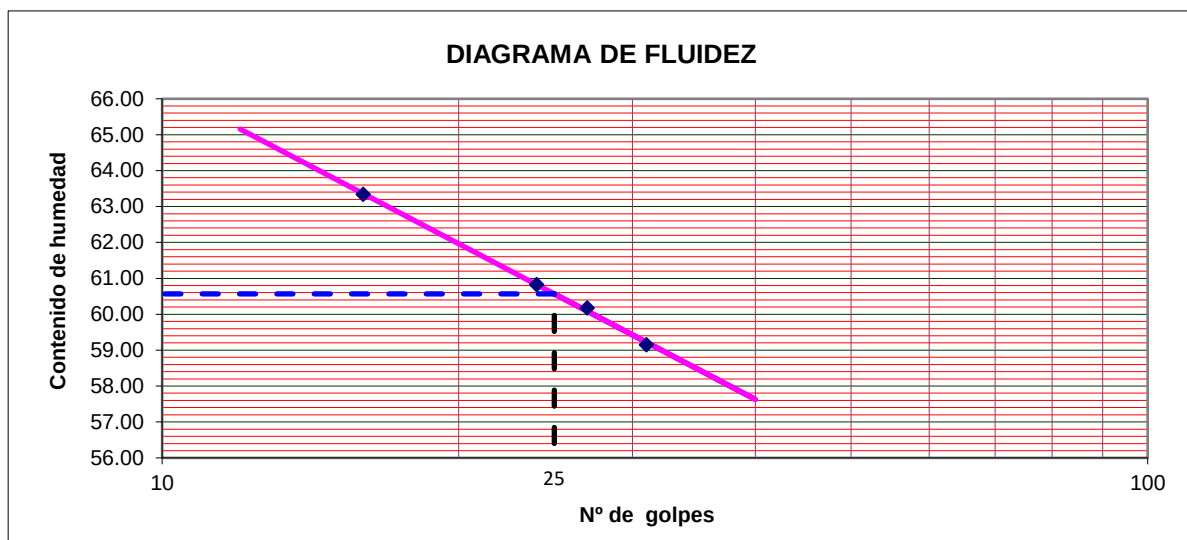
Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 5% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 61
LÍMITE PLÁSTICO : 41
ÍNDICE PLÁSTICO : 20

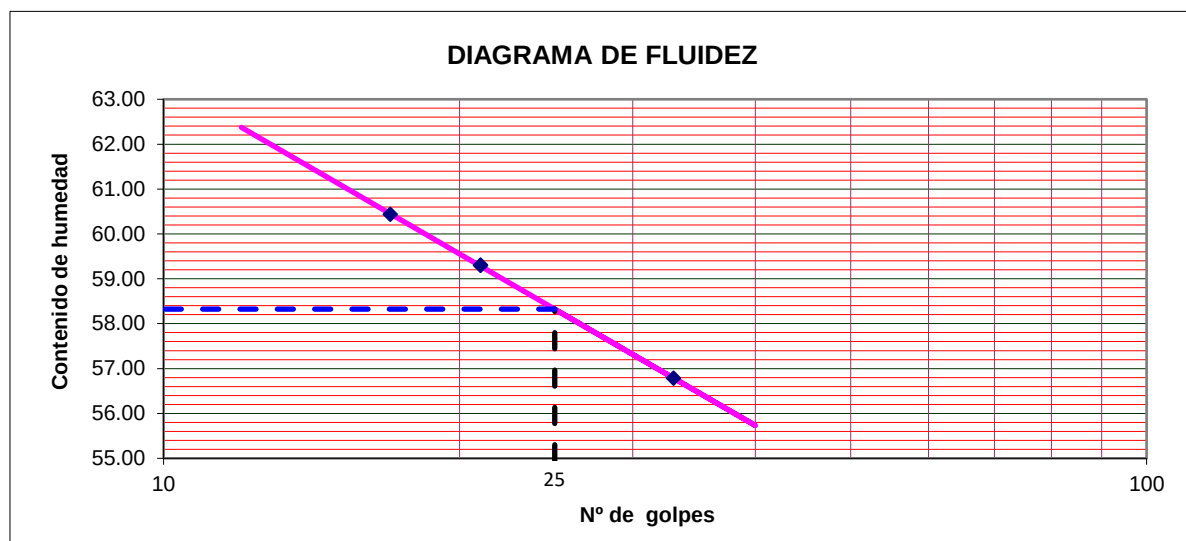
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : NOVIEMBRE 2023

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 6% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318 MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 58
LÍMITE PLÁSTICO : 27.75
ÍNDICE PLÁSTICO : 21

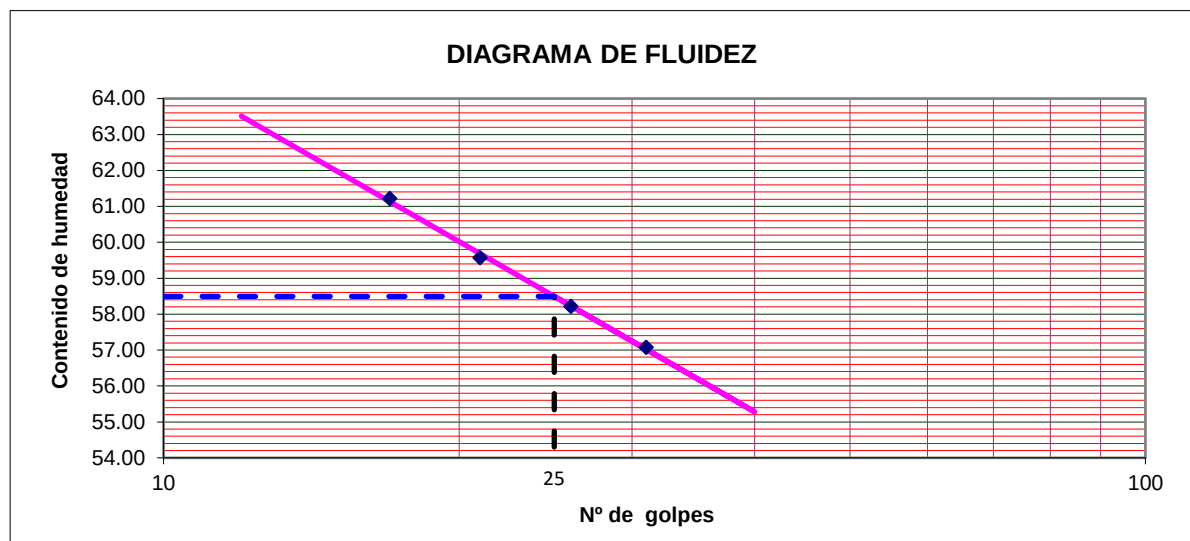
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 7% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	58
LÍMITE PLÁSTICO	:	38
ÍNDICE PLÁSTICO	:	20

Elaborado por : *Diego Sanchez*

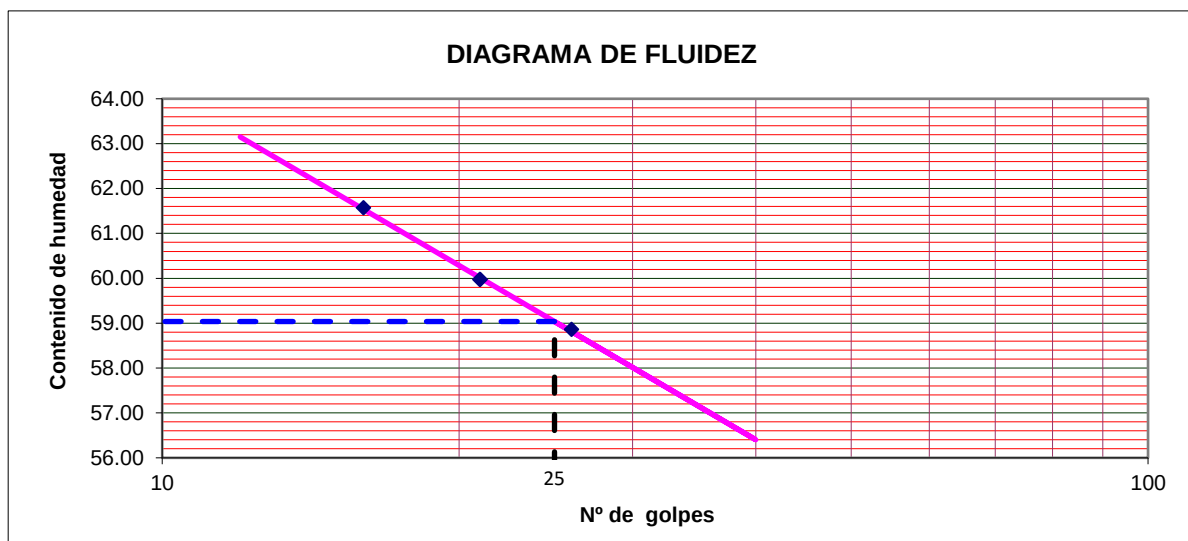
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 8% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	59
LÍMITE PLÁSTICO	:	39
ÍNDICE PLÁSTICO	:	20

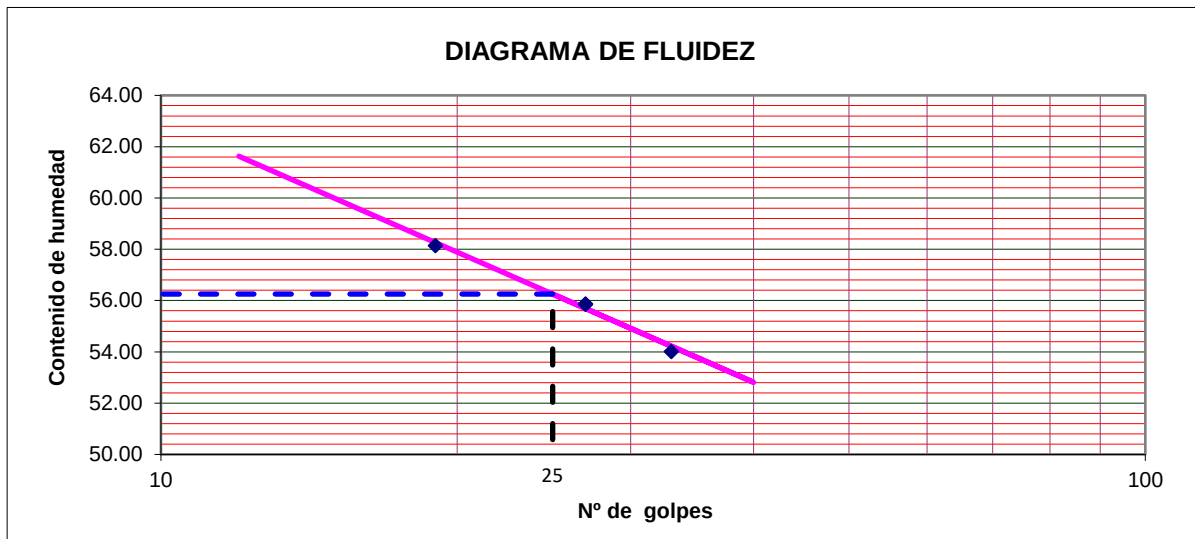
Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 9% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	56
LÍMITE PLÁSTICO	:	34
ÍNDICE PLÁSTICO	:	22

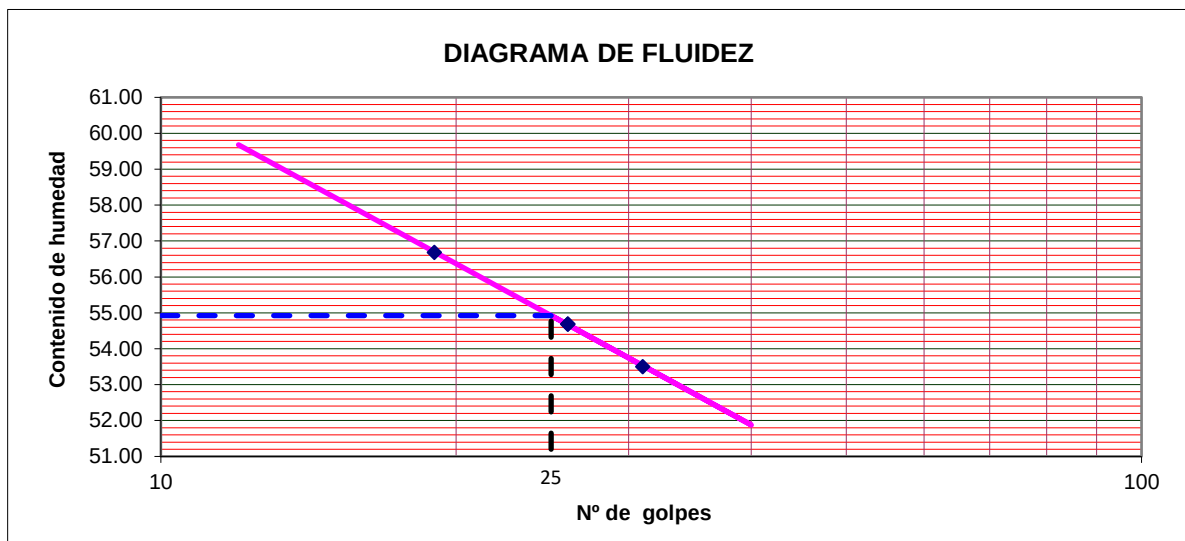
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cal + 10% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	55
LÍMITE PLÁSTICO	:	37
ÍNDICE PLÁSTICO	:	18

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

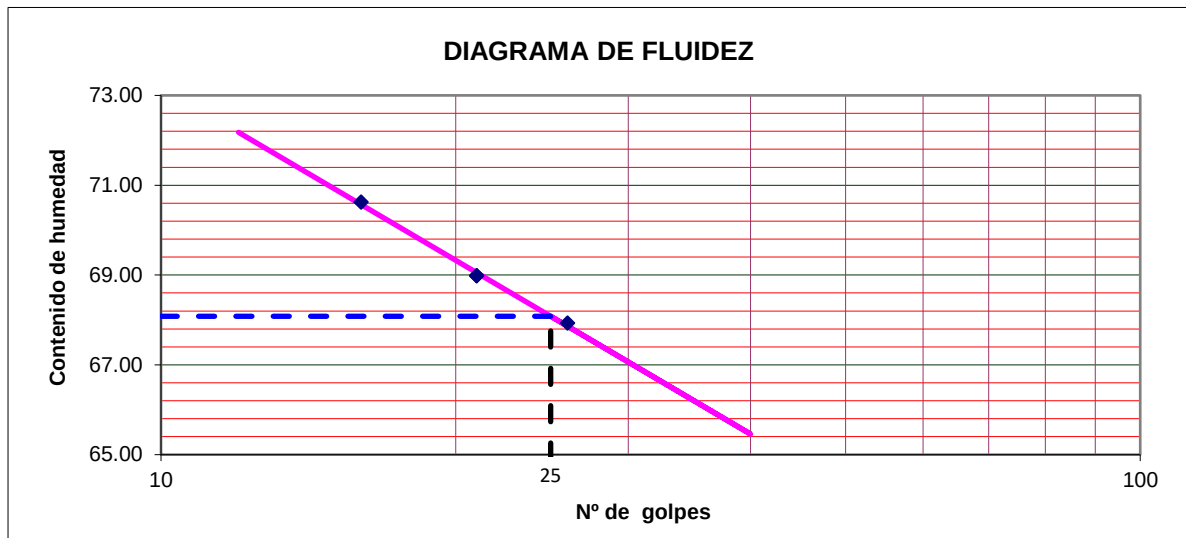
TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 1% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318

MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	68
LÍMITE PLÁSTICO	:	33
ÍNDICE PLÁSTICO	:	35

Elaborado por : *Diego Sanchez*

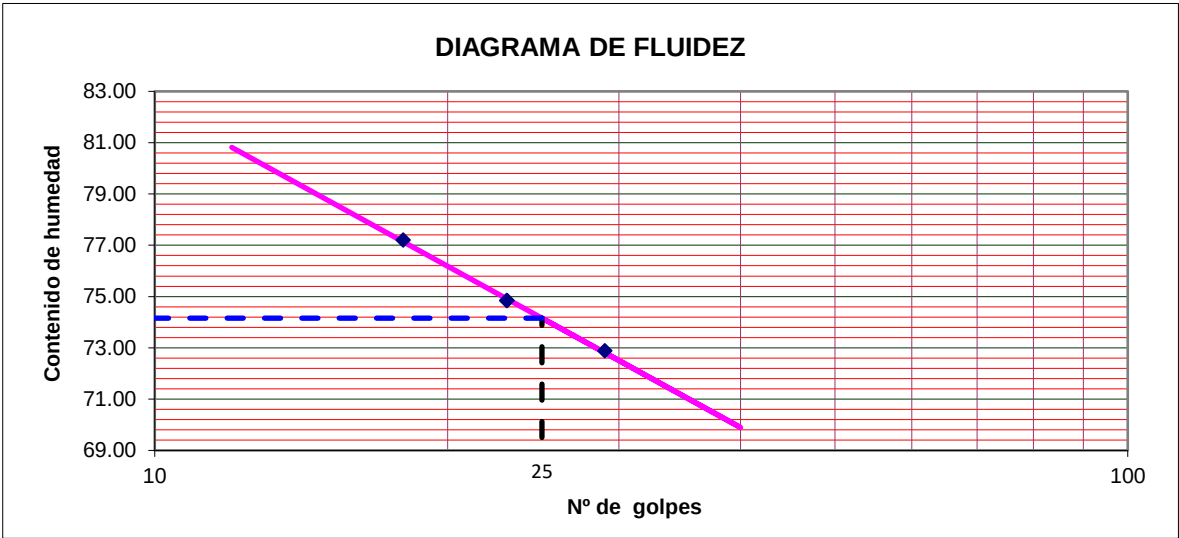
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 2% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	74
LÍMITE PLÁSTICO	:	33
ÍNDICE PLÁSTICO	:	41

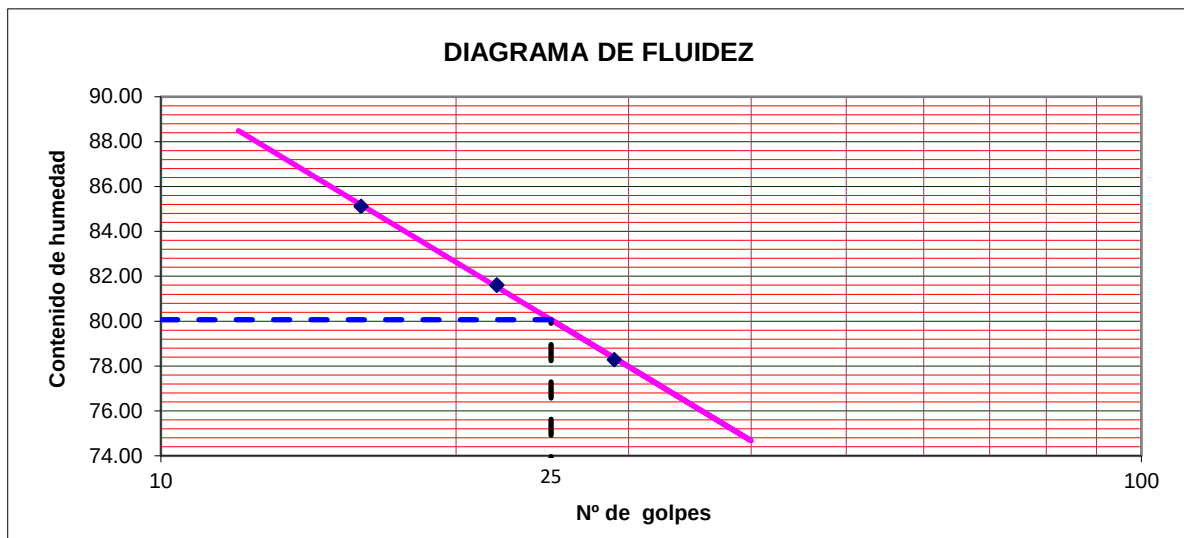
Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 3% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318 MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	80
LÍMITE PLÁSTICO	:	35
ÍNDICE PLÁSTICO	:	45

Elaborado por : *Diego Sanchez*

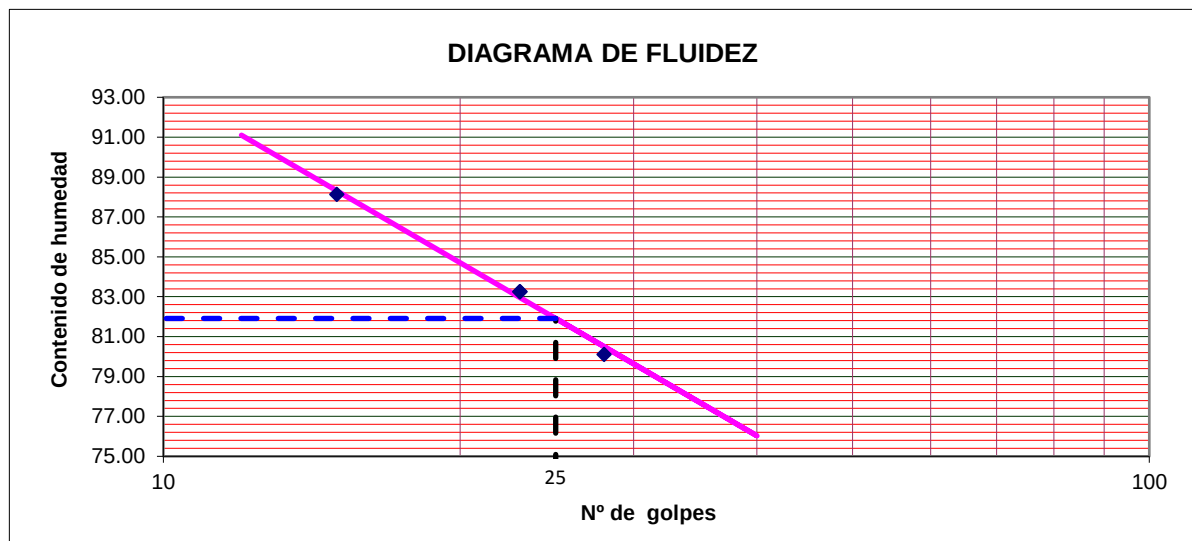
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 4% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	82
LÍMITE PLÁSTICO	:	35
ÍNDICE PLÁSTICO	:	47

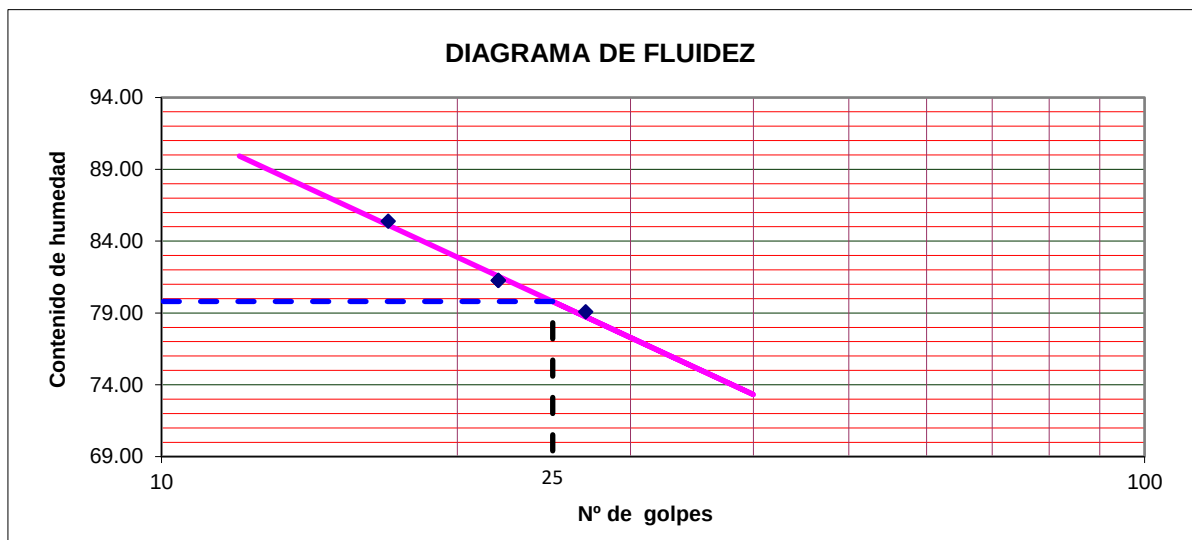
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 80
LÍMITE PLÁSTICO : 36
ÍNDICE PLÁSTICO : 44

Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

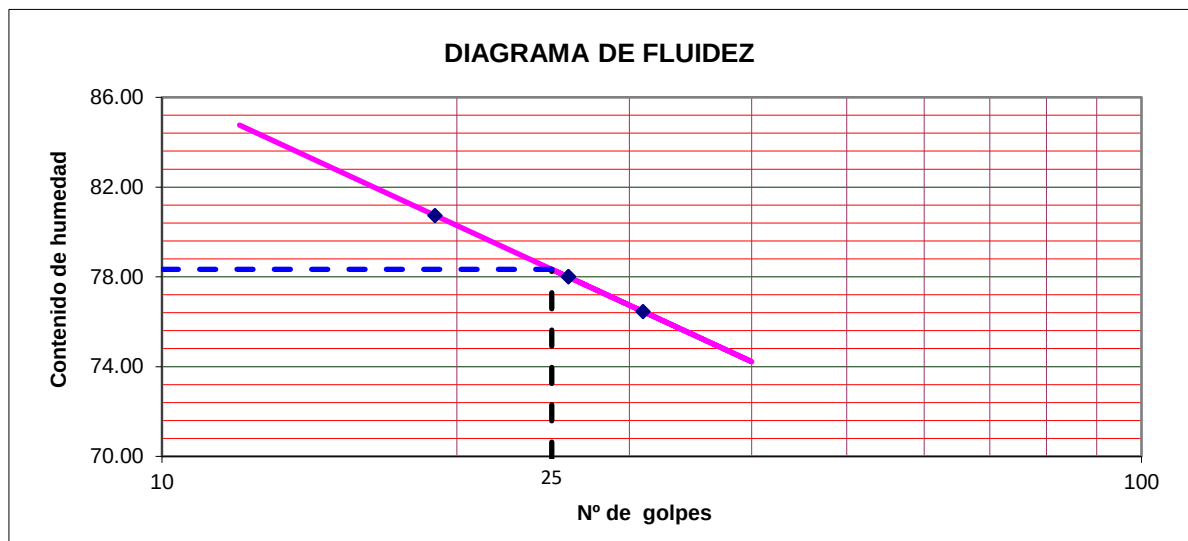
TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 6% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318

MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	78
LÍMITE PLÁSTICO	:	37
ÍNDICE PLÁSTICO	:	41

Elaborado por : *Diego Sanchez*

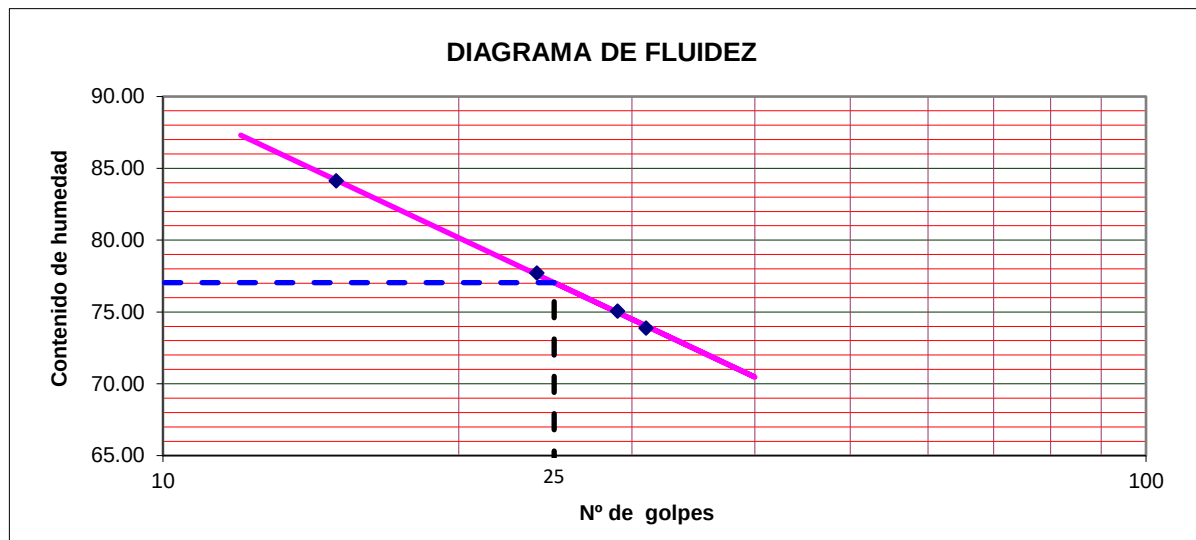
Revisado por : *Ing. César Atala*

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 7% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	77
LÍMITE PLÁSTICO	:	35
ÍNDICE PLÁSTICO	:	42

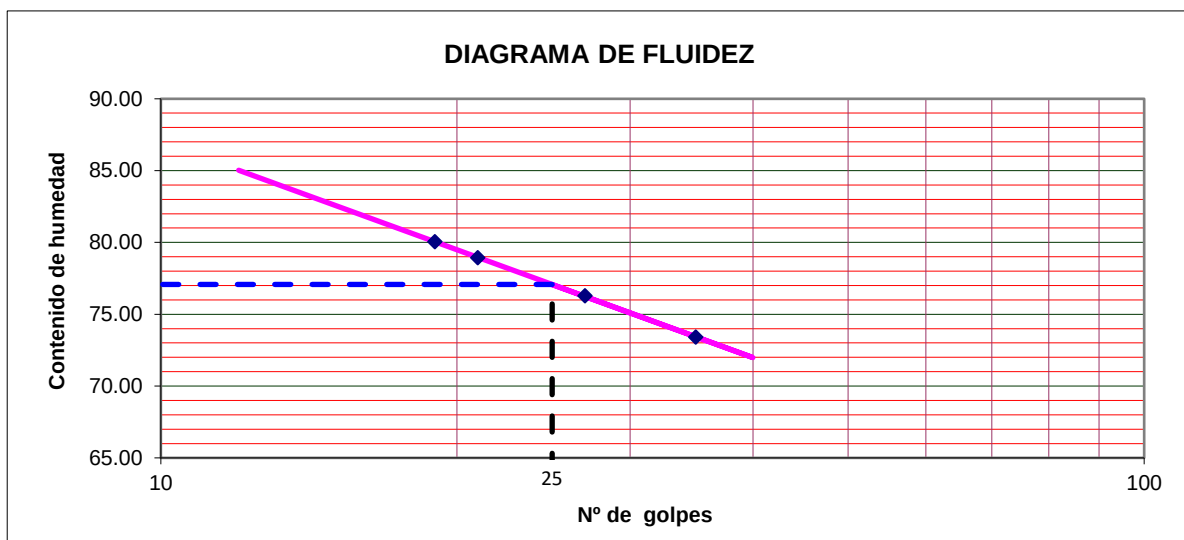
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **NOVIEMBRE 2023**

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 8% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	77
LÍMITE PLÁSTICO	:	38
ÍNDICE PLÁSTICO	:	39

Elaborado por : Diego Sanchez

Revisado por : Ing. César Atala

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE 2023

Muestra : Suelo Natural + 5.5%cal + 1% cemento

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	99.8
Nº 140	0.106	99.2
Nº 200	0.075	98.5

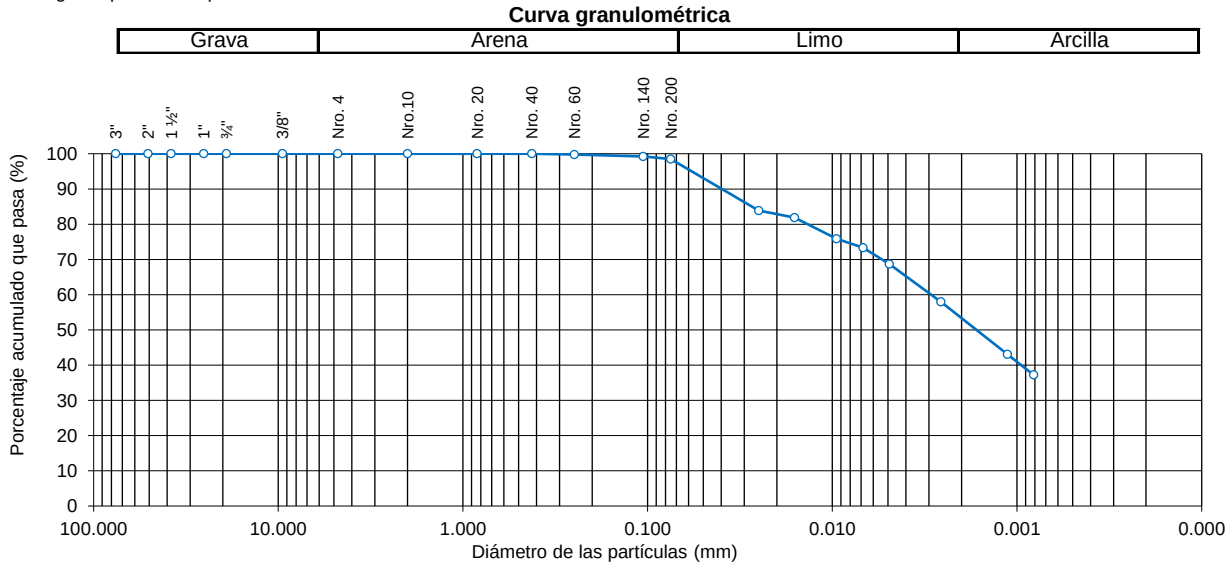
Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	1.5	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	47.0	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	51.5	< 0.002 mm	**

* Rangos especificados por ASTM
** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D854)	2.67
--	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0251	83.85
0.0160	81.90
0.0095	75.87
0.0068	73.32
0.0049	68.67
0.0026	58.01
0.0011	43.10
0.0008	37.23

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio



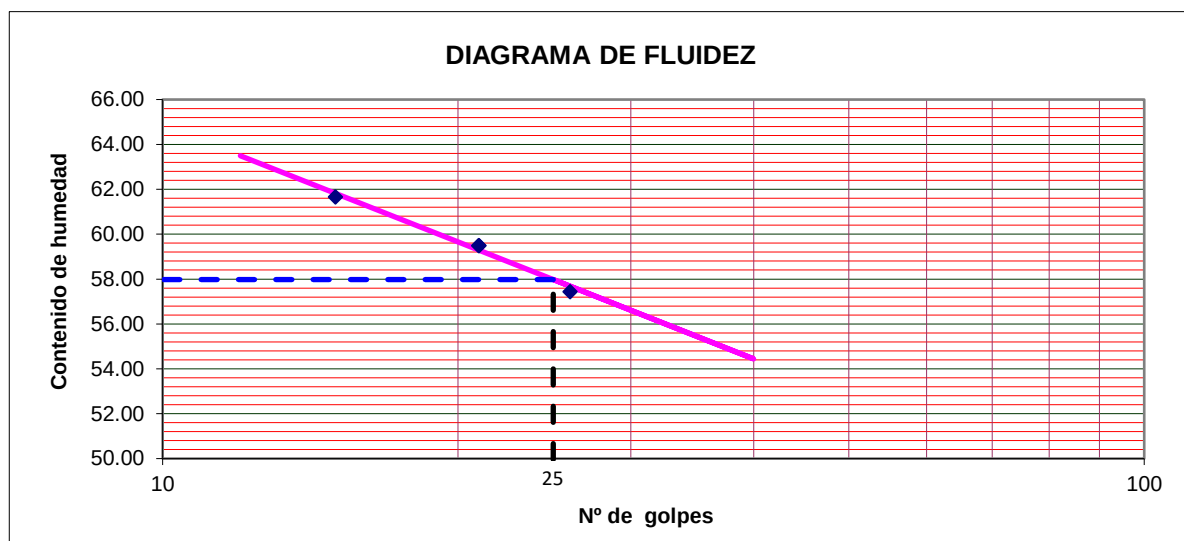
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE 2023

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318 MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO	:	58
LÍMITE PLÁSTICO	:	37
ÍNDICE PLÁSTICO	:	21

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **DICIEMBRE 2023**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVO DE SOLIDOS - REFERENCIA ASTM D854

Método "B"

Gravedad Específica Relativo de Sólidos a Temperatura de Ensayo	:	2.678
Temperatura de Ensayo (°C)	:	25.9
Gravedad Específica Relativo de Sólidos a 20 °C	:	2.674

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

ASTM D4943

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE 2023

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

ESPECIMEN	01
Plato de contracción	N° LC-2
Masa del plato de contracción	g 21.88
Masa del plato de contracción + suelo humedo	g 51.03
Masa del plato de contracción + suelo seco	g 39.19
Masa de la capa de suelo seco	g 17.31
Contenido de humedad del suelo	% 68.40
Masa de capa de suelo seco + parafina	g 21.08
Masa de capa de suelo seco + parafina, en agua	g 15.48
Masa de agua desplazada de suelo seco + parafina	g 5.60
Densidad del agua	g/cm3 1.00
Volumen de la capa de suelo seco + parafina	cm3 5.60
Masa de la parafina	g 3.77
Densidad de la parafina	g/cm3 0.88
Volumen de la parafina	cm3 4.28
Volumen de suelo seco	cm3 11.20
Límite de Contracción	% 24.36

Elaborado por : *Diego Sanchez*
Revisado por : *Ing. César Atala*

COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR MODIFICADO

ASTM D1557

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE 2023

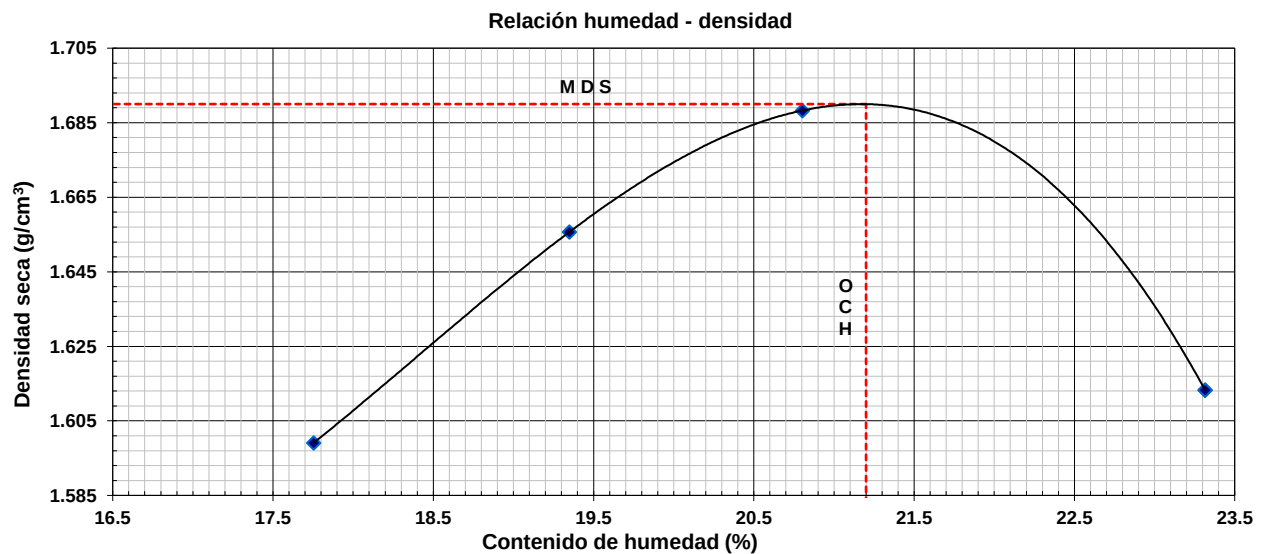
Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

Método de preparación : Seco

Descripción del pisón : Manual

Peso suelo compactado + molde	(g)	6009.50	6098.10	6158.50	6110.80	
Peso molde	(g)	4216.30	4216.30	4216.30	4216.30	
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1793.20	1881.80	1942.20	1894.50	
Volumen del molde	(cm ³)	952.30	952.30	952.30	952.30	
Densidad húmeda	(g/cm ³)	1.883	1.976	2.039	1.989	
Peso muestra húmeda + tara	(g)	405.40	328.90	316.30	206.80	
Peso muestra seca + tara	(g)	360.50	305.70	290.90	185.70	
Peso de tara	(g)	107.60	185.80	168.80	95.20	
Peso de agua	(g)	44.90	23.20	25.40	21.10	
Peso de la muestra seca	(g)	252.90	119.90	122.10	90.50	
Contenido de humedad	(%)	17.75	19.35	20.80	23.31	
Densidad seca	(g/cm ³)	1.599	1.656	1.688	1.613	

Máxima Densidad Seca	M.D.S.	1.690	g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	O.C.H.	21.20	%



Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	33.59
Altura	: mm	69.53
Area	: mm ²	886.16
Densidad Humeda	: gr/cm ³	2.07
Densidad seca	: gr/cm ³	1.69
Contenido de Humedad	: %	22.92
L/D	:	2.07
Peso Relativo de Sólidos	:	2.674
Grado de Saturacion	: %	104.51

Parámetros de Resistencia

Carga última (kPa)	:	1224.54
Cohesión (kPa)	:	612.27
Cohesión (kg/cm ²)	:	6.24

Nota :

El espécimen fue remoldeado al 99% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez

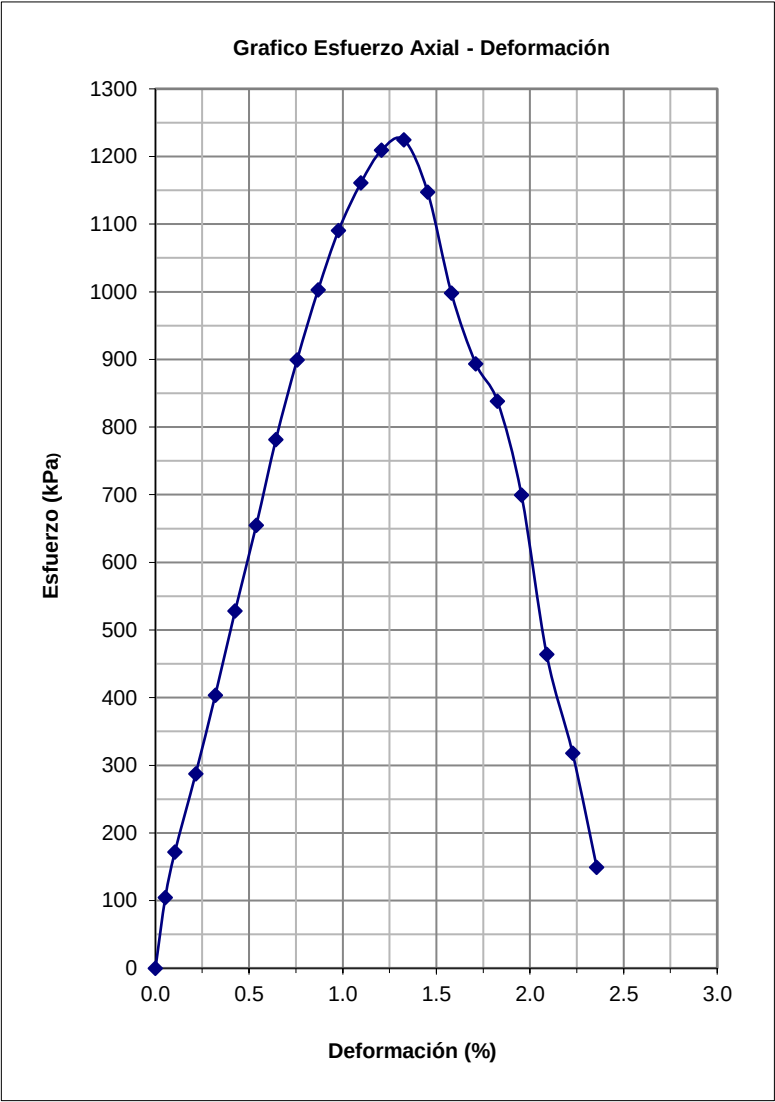
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
 PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : DICIEMBRE 2023

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
 Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)		:	33.59
Área Inicial (mm²)		:	886.16
Altura Inicial (mm)		:	69.53
Deformacion	Area Corregida	Fuerza Axial	Esfuerzo
%	mm²	(Newton)	(kPa)
0.00	0.0	0.0	0.0
0.05	886.6	144.6	104.4
0.10	887.1	237.8	171.7
0.21	888.1	397.9	287.3
0.32	889.0	558.8	403.4
0.42	889.9	731.1	527.9
0.54	891.0	906.8	654.7
0.64	891.9	1082.6	781.6
0.76	892.9	1245.5	899.2
0.87	893.9	1388.9	1002.7
0.98	894.9	1510.5	1090.6
1.10	896.0	1608.0	1160.9
1.21	897.0	1674.9	1209.2
1.33	898.1	1696.1	1224.5
1.45	899.2	1589.1	1147.3
1.58	900.4	1382.1	997.9
1.71	901.6	1237.7	893.6
1.83	902.6	1160.8	838.1
1.95	903.8	969.0	699.6
2.09	905.1	642.8	464.1
2.23	906.3	440.1	317.7
2.36	907.5	206.8	149.3



Nota :
 El espécimen fue remoldeado al 99% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
 Elaborado por : Diego Sanchez
 Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

DICIEMBRE 2023

ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D4546)

Estado

:

Remoldeado (material < Tamiz N°4)

Muestra

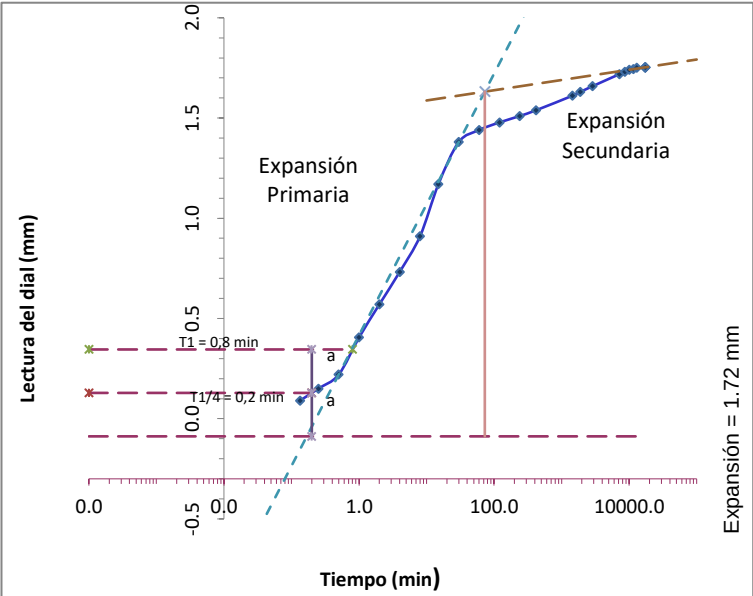
:

Suelo Natural + 5.5% cal + 1% cemento

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	6.2	6.2
Altura(mm)	20.0	21.8
Densidad Seca (gr/cm3)	1.68	1.55
Densidad Húmeda (gr/cm3)	1.85	1.96
Húmedad (%)	9.92	27.08
Saturación (%)	44.9	99.1
Gravedad de solidos (Gs)	2.67	2.67
Relación de vacios (e)	0.591	0.731

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.090	0.45
0.25	0.150	0.75
0.5	0.220	1.10
1	0.405	2.02
2	0.570	2.85
4	0.732	3.66
8	0.910	4.55
15	1.170	5.84
30	1.380	6.89
60	1.440	7.19
120	1.478	7.38
240	1.510	7.54
420	1.539	7.69
1440	1.611	8.05
1890	1.630	8.14
2880	1.659	8.29
7200	1.719	8.59
8640	1.731	8.65
10080	1.741	8.70
11520	1.744	8.71
12960	1.751	8.75
17280	1.753	8.76
17280	1.753	8.76
17280	1.753	8.76
17280	1.753	8.76



EXPANSIÓN LIBRE (%) : 8.59

Nota:
El espécimen fue remoldeado al 99% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO Y SEDIMENTACIÓN

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : FEBRERO 2024

Muestra : Suelo Natural + 2% cemento

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913)		
Nro. Malla	Abertura (mm)	% Acum. que pasa
3"	76.200	100.0
2"	50.800	100.0
1 1/2"	38.100	100.0
1"	25.400	100.0
3/4"	19.100	100.0
3/8"	9.520	100.0
Nº 4	4.760	100.0
Nº 10	2.000	100.0
Nº 20	0.840	100.0
Nº 40	0.425	100.0
Nº 60	0.250	99.8
Nº 140	0.106	99.4
Nº 200	0.075	98.7

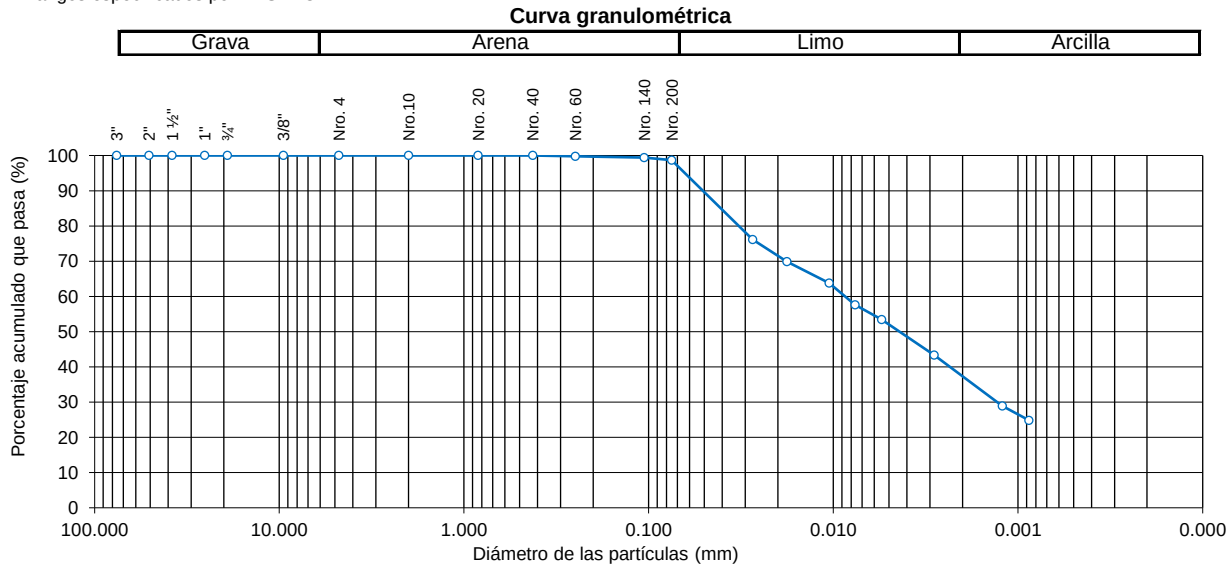
Grava	%	0.0	76.2 mm - 4.75 mm	*
Arena	%	1.3	4.75 mm - 0.075 mm	*
Limo	%	63.6	0.075 mm - 0.002 mm	**
Arcilla	%	35.1	< 0.002 mm	**

* Rangos especificados por ASTM
** Rangos especificados por AASTHO

Gravedad específica de sólidos (ASTM D854)	2.69
--	------

Granulometría por sedimentación (ASTM D7928)	
Diámetro de partícula (mm)	% Acum. que pasa
0.0274	76.14
0.0178	69.84
0.0105	63.75
0.0076	57.59
0.0055	53.46
0.0028	43.31
0.0012	28.91
0.0009	24.85

Tipo de hidrómetro	152H
Agente dispersante	Hexametáfosfato de sodio



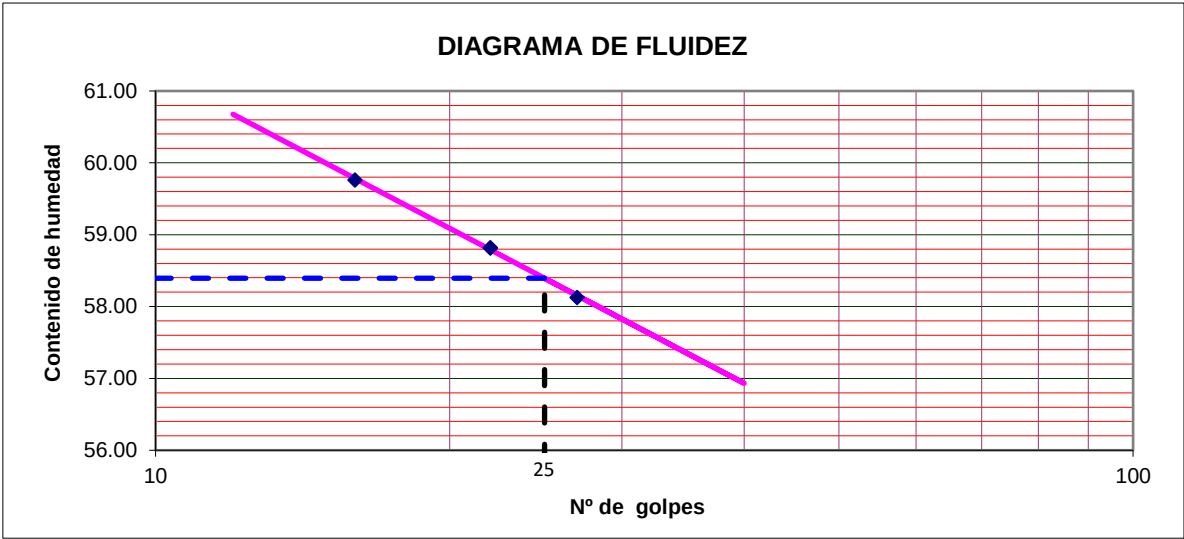
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : FEBRERO 2024

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento

I. ENSAYO LIMITES DE CONSISTENCIA - REFERENCIA ASTM D4318
MATERIAL QUE PASA LA MALLA N° 40



LÍMITE LÍQUIDO : 58
LÍMITE PLÁSTICO : 37
ÍNDICE PLÁSTICO : 21

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **FEBRERO 2024**

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento

GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVO DE SOLIDOS - REFERENCIA ASTM D854

Método "B"

Gravedad Específica Relativo de Sólidos a Temperatura de Ensayo	:	2.697
Temperatura de Ensayo (°C)	:	27.0
Gravedad Específica Relativo de Sólidos a 20 °C	:	2.693

Elaborado por : *Diego Sanchez*

Revisado por : *Ing. César Atala*

LÍMITE DE CONTRACCIÓN

ASTM D4943

TESISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : FEBRERO 2024

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento

ESPECIMEN		01
Plato de contracción	N°	LC-3
Masa del plato de contracción	g	22.66
Masa del plato de contracción + suelo humedo	g	53.08
Masa del plato de contracción + suelo seco	g	40.83
Masa de la capa de suelo seco	g	18.17
Contenido de humedad del suelo	%	67.42
Masa de capa de suelo seco + parafina	g	20.95
Masa de capa de suelo seco + parafina, en agua	g	16.25
Masa de agua desplazada de suelo seco + parafina	g	4.70
Densidad del agua	g/cm3	1.00
Volumen de la capa de suelo seco + parafina	cm3	4.70
Masa de la parafina	g	2.78
Densidad de la parafina	g/cm3	0.88
Volumen de la parafina	cm3	3.16
Volumen de suelo seco	cm3	13.09
Límite de Contracción	%	31.49

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

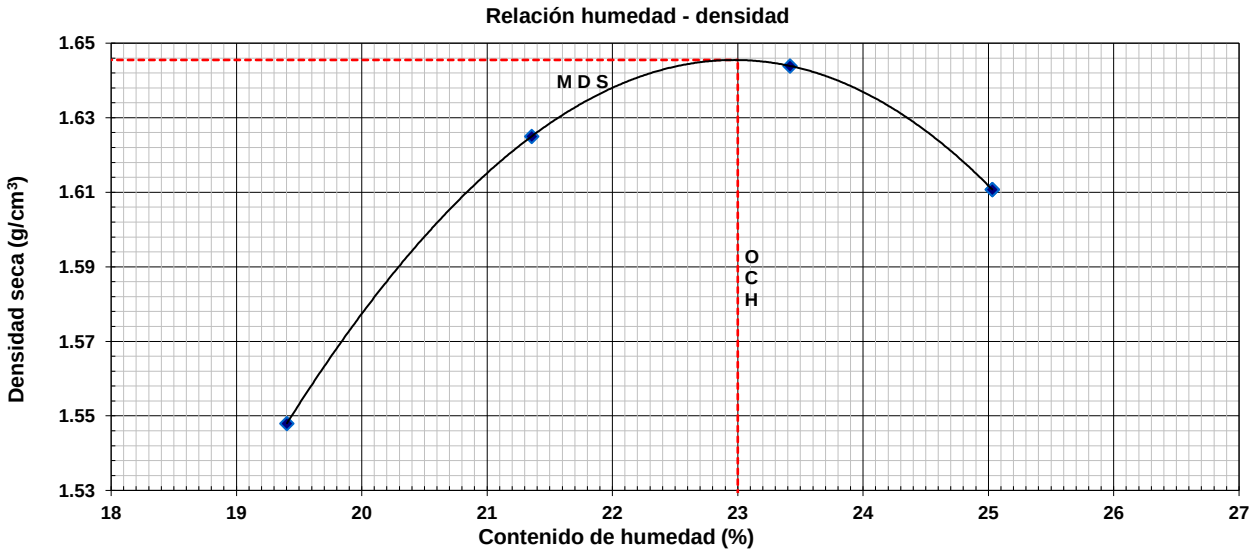
COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO - PRÓCTOR MODIFICADO
 ASTM D1557

TESISISTA : DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE
 TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
 PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
 UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
 FECHA DE EJECUCIÓN : FEBRERO 2024

Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento
 Método de preparación : Seco
 Descripción del pisón : Manual

Peso suelo compactado + molde	(g)	5960.40	6077.10	6130.70	6116.60	
Peso molde	(g)	4216.30	4216.30	4216.30	4216.30	
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1744.10	1860.80	1914.40	1900.30	
Volumen del molde	(cm³)	943.59	943.59	943.59	943.59	
Densidad húmeda	(g/cm³)	1.848	1.972	2.029	2.014	
Peso muestra húmeda + tara	(g)	171.80	310.30	253.10	297.80	
Peso muestra seca + tara	(g)	158.80	276.90	222.40	258.20	
Peso de tara	(g)	91.80	120.50	91.30	100.00	
Peso de agua	(g)	13.00	33.40	30.70	39.60	
Peso de la muestra seca	(g)	67.00	156.40	131.10	158.20	
Contenido de humedad	(%)	19.40	21.36	23.42	25.03	
Densidad seca	(g/cm³)	1.548	1.625	1.644	1.611	

Máxima Densidad Seca	M.D.S.	1.646	g/cm³
Óptimo Contenido de Humedad	O.C.H.	23.00	%



Elaborado por : Diego Sanchez
 Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA
FECHA DE EJECUCIÓN : FEBRERO 2024

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA ASTM D2166

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento

ESPECIMEN

Condiciones Iniciales	Und.	
Diámetro	: mm	34.35
Altura	: mm	68.80
Area	: mm ²	926.71
Densidad Humeda	: gr/cm ³	2.06
Densidad seca	: gr/cm ³	1.67
Contenido de Humedad	: %	23.47
L/D	:	2.00
Peso Relativo de Sólidos	:	2.693
Grado de Saturacion	: %	103.26

Parámetros de Resistencia		
Carga última (kPa)	:	1903.91
Cohesión (kPa)	:	951.96
Cohesión (kg/cm²)	:	9.70

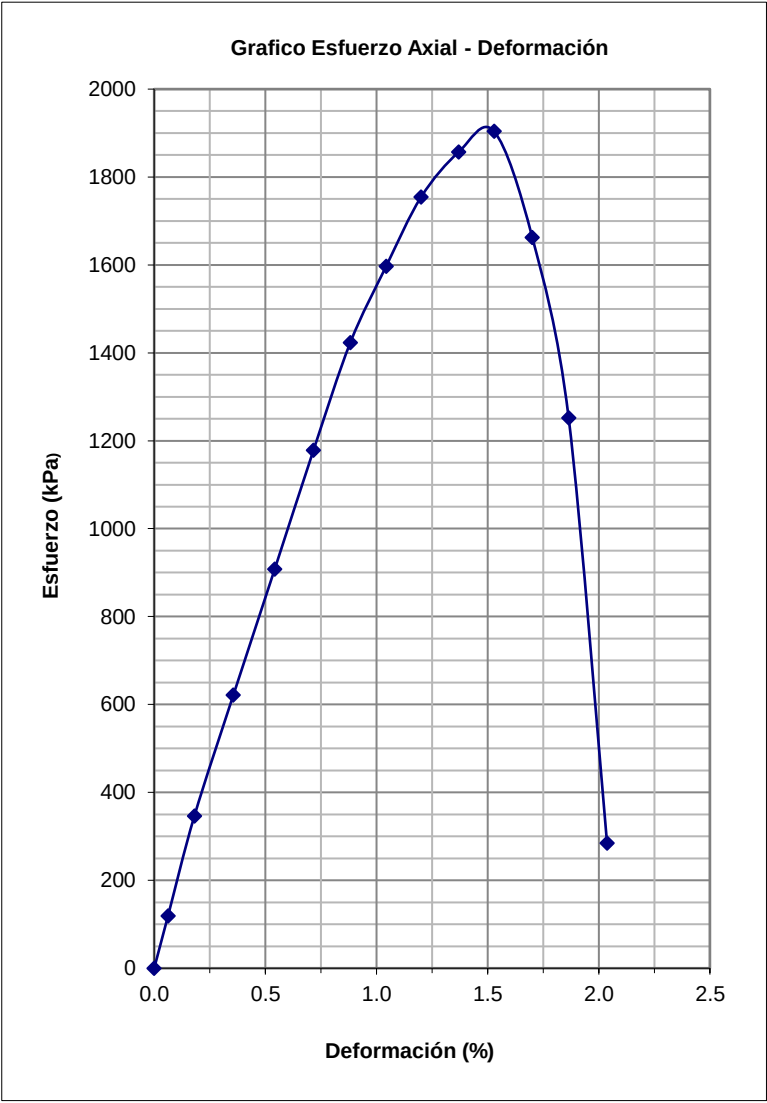
Nota :
El espécimen fue remoldeado al 102% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA : **DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE**
TÍTULO DE TESIS : **ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS**
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA
UBICACIÓN : **URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA**
FECHA DE EJECUCIÓN : **FEBRERO 2024**

ENSAYO DE COMPRESION NO CONFINADA - REFERENCIA (ASTM D2166)

Estado : Remoldeado (con la matriz < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento

Especimen N° 1			
Diámetro Inicial (mm)	:	34.35	
Área Inicial (mm²)	:	926.71	
Altura Inicial (mm)	:	68.80	
Deformacion	Area	Fuerza	Esfuerzo
%	Corregida	Axial	(kPa)
	mm²	(Newton)	
0.00	0.0	0.0	0.0
0.06	927.3	14.0	119.0
0.18	928.4	29.8	346.2
0.36	930.0	49.8	621.3
0.54	931.8	75.1	907.8
0.72	933.4	102.2	1178.0
0.88	935.0	127.5	1423.0
1.04	936.5	154.9	1596.4
1.20	938.0	184.3	1754.4
1.37	939.6	214.9	1857.0
1.53	941.1	246.5	1903.9
1.70	942.7	278.5	1662.5
1.86	944.3	310.2	1252.4
2.04	946.0	339.0	284.4



Nota :
El espécimen fue remoldeado al 102% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.
Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala

TESISTA

:

DIEGO ANDRE SANCHEZ MOROTE

TÍTULO DE TESIS

:

ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO EN LOS SUELOS EXPANSIVOS
PROVENIENTES DE LA CIUDAD DE TALARA, PIURA

UBICACIÓN

:

URB. SUDAMERICA, TALARA, PIURA

FECHA DE EJECUCIÓN

:

FEBRERO 2024

ENSAYO DE EXPANSION LIBRE (ASTM D4546)

Estado

:

Remoldeado (material < Tamiz N°4)

Muestra

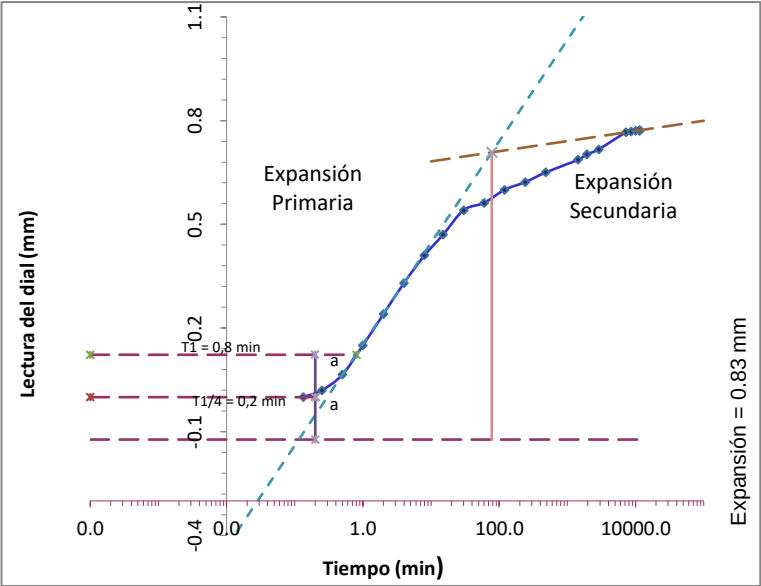
:

Suelo Natural + 5.5% cal + 2% cemento

CARACTERISTICAS DEL ESPECIMEN

	INICIAL	FINAL
Diámetro(mm)	61.7	61.7
Altura(mm)	20.1	20.8
Densidad Seca (gr/cm3)	1.68	1.62
Densidad Húmeda (gr/cm3)	1.84	2.02
Húmedad (%)	9.64	24.76
Saturación (%)	42.9	100.0
Gravedad de solidos (Gs)	2.69	2.69
Relación de vacios (e)	0.605	0.666

ETAPA DE EXPANSIÓN		
Tiempo (min)	Lectura Dial (mm)	Expansion Libre (%)
0	0.000	0.00
0.13	0.000	0.00
0.25	0.020	0.10
0.5	0.065	0.32
1	0.150	0.75
2	0.240	1.20
4	0.330	1.65
8	0.410	2.04
15	0.470	2.34
30	0.541	2.70
60	0.562	2.80
120	0.600	2.99
240	0.622	3.10
480	0.650	3.24
1440	0.687	3.43
1920	0.702	3.50
2880	0.717	3.58
7200	0.766	3.82
8640	0.768	3.83
10080	0.770	3.84
11520	0.772	3.85



EXPANSIÓN LIBRE (%) : 4.14

Nota:
El espécimen fue remoldeado al 102% de la M.D.S. del ensayo Proctor Modificado.

Elaborado por : Diego Sanchez
Revisado por : Ing. César Atala