



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Tipos de estabilizadores para mejorar suelos
colapsables en pavimentos industriales

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero(a) civil

AUTORES

Blas Soto, Brayand Lincoln
ORCID: 0000-0003-3233-3689

Arce Figueroa, Camille Jazmin
ORCID: 0000-0003-4392-3916

ASESOR

Arevalo Lay, Victor Eleuterio
ORCID: 0000-0002-2518-8201

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos del autor(es)

Blas Soto, Brayand Lincoln

DNI: 75889850

Arce Figueroa, Camille Jazmin

DNI: 71425617

Datos de asesor

Arevalo Lay, Victor Eleuterio

DNI: 04434662

Datos del jurado

JURADO 1

Támara Rodríguez, Joaquín Samuel

DNI: 31615059

ORCID: 0000-0002-4568-9759

JURADO 2

Huamán Guerrero, Néstor Wilfredo

DNI: 10281360

ORCID: 0000-0002-7722-8711

JURADO 3

Donayre Córdova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado con mucho cariño a mis padres Eugenio y Marilú, por darme el apoyo y la motivación que necesitaba durante el transcurso de mi carrera y tesis; a mis familiares y amigos. Para ellos dedico este trabajo por creer en mí, en mi capacidad y potencial para llegar a la meta.

(Arce Figueroa, Camille Jazmin)

La presente tesis está dedicada a mi abuela que, aunque no esté presente en cuerpo, siempre está acompañándome; a mis padres Jesús y Margot, por su esfuerzo, dedicación y sobre todo su apoyo constante. A mi familia y las personas que estuvieron en este proceso sacrificado conmigo. Gracias a ellos.

(Blas Soto, Brayand Lincoln)

AGRADECIMIENTO

Damos gracias a Dios por darnos la oportunidad de culminar esta meta en nuestra vida profesional. Agradecemos a nuestros padres, por su apoyo incondicional en cada aspecto de nuestras vidas. También agradecer a la Universidad Ricardo Palma por brindarnos la información necesaria con el fin de realizar el proyecto de mejora.

(Camille Arce Figueroa y Brayand Blas Soto)

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
INTRODUCCIÓN.....	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACION DEL PROBLEMA	1
1.1. Formulación y delimitación del problema.....	1
1.1.1 Problema general.....	3
1.1.2 Problema específico	3
1.2. Objetivo general y específico	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivo específico.....	4
1.3. Delimitación de la investigación: temporal, espacial y temática.....	4
1.3.1 Delimitación temporal.....	4
1.3.2 Delimitación espacial	4
1.4. Justificación e importancia	4
1.4.1 Justificación teórica.....	4
1.4.2 Justificación metodológica.....	5
1.4.3 Justificación practica.....	5
1.4.4 Justificación social	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes del estudio de investigación	6
2.1.1 Investigaciones internacionales.....	6
2.1.2 Investigaciones nacionales	9
2.2. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio.....	11
2.2.1 Estabilización del suelo.....	11
2.2.2 Propiedades de los suelos colapsables	21
2.2.3 Suelos colapsables.....	31
2.3. Definición de términos básicos.....	48
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	50
3.1. Hipótesis	50
3.1.1 Hipótesis general	50
3.1.2 Hipótesis específicas	50
3.2. Variables.....	50

3.2.1 Definición conceptual de las variables.....	50
3.2.2 Operacionalización de las variables	50
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	52
4.1 Tipo y nivel.....	52
4.1.1 Tipo de investigación	52
4.1.2 Método de la investigación	52
4.2 Diseño de investigación.....	53
4.3 Población y muestra.....	53
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	53
4.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos.....	53
4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos	53
4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos	53
4.5 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información.....	54
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
5.1. Estudio de las Propiedades de los Suelos del área de estudio.	55
5.1.1 Aspecto Geológico	55
5.1.2 Aspecto Climatológico-Geodinámico	56
5.1.3 Aspectos Geotécnicos	56
5.2. Selección de los tipos de estabilización.....	74
5.3. Propuesta del tipo de estabilizador	81
5.4. Análisis de Resultados	87
5.5. Contrastación de Hipótesis	92
5.5.1 Hipótesis específica 1	92
5.5.2 Hipótesis específica 2.....	94
5.5.3 Hipótesis específica 3.....	95
5.5.4 Hipótesis general	96
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXO.....	101
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	101
Anexo 2: Matriz de Operacionalización	102
Anexo 3: Resultados de ensayos de laboratorio	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Medición cuantitativa de índice de colapso (%).....	38
Tabla 2. Categorías de subrasante.....	41
Tabla 3. Ubicación de calicatas.....	57
Tabla 4. Densidad In situ	59
Tabla 5. Resumen de Límites de Atterberg.....	62
Tabla 6. Humedad Natural y Humedad Óptima	64
Tabla 7. Clasificación de Suelos	65
Tabla 8. Resumen de los ensayos estándar de laboratorio.....	65
Tabla 9. Resultado de ensayo de Cloruros, Sales Solubles y Carbonatos	66
Tabla 10. Valores de Proctor Modificado y CBR.....	67
Tabla 11. Parámetros para la relación entre los colapsables y no colapsables	68
Tabla 12. Parámetros determinados por ensayos de laboratorio.....	69
Tabla 13. Criterios de identificación de suelos colapsables según diversos autores	71
Tabla 14. Grado de potencial de colapso	73
Tabla 15. Resistencias mínimas a la compresión no confinada.....	77
Tabla 16. Límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP) y % pasa malla 200.....	81
Tabla 17. Propiedades Físicas y Mecánicas del suelo patrón	82
Tabla 18. Resistencia a la compresión no confinada Suelo-Cemento 7 días.....	84
Tabla 19. Límites de Atterberg de los materiales utilizados.....	87
Tabla 20. Humedad Óptima y Densidad Máxima.....	88
Tabla 21. Resultados ensayos de CBR	90
Tabla 22. Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento MTC 1103.....	91
Tabla 23. Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento MTC 1103.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Paita	2
Figura 2. Características del tipo de suelo y método de compactación	13
Figura 3. Uso de geosintéticos para disminuir el contenido de humedad.....	14
Figura 4. Proceso de selección del Tipo de Estabilización	15
Figura 5. Guía Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador	16
Figura 6. Guía Complementaria para la Selección del Tipo de Estabilizador	17
Figura 7. Rango usual de cemento requerido.....	21
Figura 8. Curva granulométrica	22
Figura 9. Esquema de la consistencia del suelo	23
Figura 10. Carta de plasticidad de Casagrande	24
Figura 11. Clasificación de suelos en función de la granulometría.	25
Figura 12. Cuadro de clasificación AASHTO	26
Figura 13. Cuadro de clasificación SUCS	27
Figura 14. Familia de suelos colapsables.....	32
Figura 15. Estructura típica de los suelos colapsables.....	33
Figura 16. Esquema de las características clave de suelos colapsables	34
Figura 17. Criterios del Potencial de Colapso	35
Figura 18. Criterios para la identificación de suelos colapsables	36
Figura 19. Ensayo de normalizado del potencial de colapso.	37
Figura 20. Criterios de Colapsabilidad	39
Figura 21. Distribución de esfuerzos de un piso industrial.....	42
Figura 22. Paquete estructural típico de un piso industrial de hormigón.....	43
Figura 23. Cargas temporales de trailers de transporte frigorífico)	44
Figura 24. Cargas estáticas o “muertas” y estados combinados de carga.....	45
Figura 25. Tensión vs tiempo para esfuerzos de tracción en el pavimento	46
Figura 26. Cargas dinámicas o vivas	47
Figura 27. Carta Geológica Nacional Paita 11a.....	55
Figura 28. Excavación de Calicatas	57
Figura 29. Ubicación de calitas.....	58
Figura 30. Conglomerados Calcáreos	58
Figura 31. Ensayo de Cono de Arena a 1 metro de profundidad	59
Figura 32. Análisis Granulométrico por Tamizado C-1 M-1.....	60

Figura 33. Análisis Granulométrico por Tamizado C-2 M-1.....	61
Figura 34. Análisis Granulométrico por Tamizado C-3 M-1.....	61
Figura 35. Análisis Granulométrico.....	62
Figura 36. Ensayos de límite líquido	63
Figura 37. Ensayos de límite plástico	63
Figura 38. Clasificación de suelos según índice de plasticidad.....	64
Figura 39. Categorías de Sub rasante.....	67
Figura 40. Criterios del potencial de colapso.....	68
Figura 41. Criterio para medir el potencial de colapso	69
Figura 42. Relación de fases del suelo en condiciones naturales.....	70
Figura 43. Triángulo de gradación para seleccionar un agente estabilizador	75
Figura 44. Tabla para seleccionar un agente estabilizador	76
Figura 45. Requisitos de gradación.....	78
Figura 46. Requisitos de cemento estimado para varios tipos de Suelos.....	79
Figura 47. Requerimientos promedio de cemento para suelos limosos y arcillosos.....	79
Figura 48. Determinación inicial del contenido de cal	80
Figura 49. Relaciones Humedad – Densidad del Suelo-Cemento para 7% y 8%.....	83
Figura 50. Probetas con 7% cemento y 8% cemento.....	83
Figura 51. Ensayo de Compresión no confinada para briqueta Suelo Cemento.....	84
Figura 52. Preparación del molde de “CBR” al (2.5% - 3%) de cal.....	85
Figura 53. Ensayo “CBR” al (2.5% - 3%) de cal.....	85
Figura 54. Ensayo “CBR” al (2.5% - 3%) de cal.....	86
Figura 55. Ejemplo de Estructura de Pavimento.....	87
Figura 56. Resultados del IP del suelo con 2.5%, 3% de cal y 7%, 8% de cemento.	87
Figura 57. Curvas de Proctor modificado para cal y cemento	89
Figura 58. Resultados del CBR al 95% con 2.5%, 3% de cal	90
Figura 59. Porcentaje de aumento de CBR.....	90

RESUMEN

Se desarrolló la investigación en la zona de Paita-Alta en la provincia de Paita. Se empleó la metodología deductiva-aplicada, debido a que se utilizó información precedente en investigaciones y normas técnicas, analizando información relacionada a la zona de estudio y desarrollando ensayos en laboratorio para la identificación y mejoramiento de suelos colapsables. Según resultados se clasificó el suelo como una arena pobremente gradada y arena arcillosa (SP-SC), con media plasticidad, %CBR entre 5.7% y 8.7%. Además, la zona presentó suelos colapsables que contienen sales y sulfatos conglomerados con carbonatos.

Tales características nos llevaron a revisar diferentes teorías y criterios de diversos autores para identificar este tipo de suelo en base a sus propiedades físicas (límites líquido, peso volumétrico seco, porosidad, etc.) y a realizar el ensayo de colapsabilidad. Obteniendo un índice de colapso de 1.46, que indicó un colapso leve. Según sus propiedades físicas e índice de colapso se propuso una estabilización química mediante la adición de 2.5%, 3% de cal y 7 y 8% de cemento con el fin de analizar la incidencia de estos tipos de estabilizadores en las propiedades físicas y mecánicas del suelo colapsable.

Se realizaron ensayos de laboratorio siguiendo las diferentes normativas obteniendo con 3% de cal un incremento del 6.9% del CBR al 95% de la máxima densidad seca y disminución en un 3.3% del índice de plasticidad y con 8% de cemento se halló una resistencia inicial a los 7 días de 1.8 Mpa y se anuló la plasticidad del suelo en estudio.

Palabras Clave: Colapso, estabilización, pavimento cal, cemento.

ABSTRACT

The research was carried out in the Paita-Alta area in the province of Paita. The deductive-applied methodology was used, because precedent information was used in research and technical standards, analyzing information related to the study area and developing laboratory tests for the identification and improvement of collapsible soils. According to the results, the soil was classified as poorly graded sand and clayey sand (SP-SC), with medium plasticity, %CBR between 5.7% and 8.7%. In addition, the area presented collapsible soils containing salts and sulfates conglomerated with carbonates.

Such characteristics led us to review different theories and criteria of various authors to identify this type of soil based on its physical properties (liquid limits, dry volumetric weight, porosity, etc.) and to perform the collapsibility test. Obtaining a collapse index of 1.46, which indicated a slight collapse. According to its physical properties and collapse index, chemical stabilization was proposed by adding 2.5%, 3% lime and 7 and 8% cement in order to analyze the incidence of these types of stabilizers on the physical and mechanical properties of the collapsible soil.

Laboratory tests were carried out following the different standards, obtaining with 3% lime an increase of 6.9% of the CBR at 95% of the maximum dry density and a decrease of 3.3% of the plasticity index, and with 8% cement, an initial resistance of 1.8 Mpa at 7 days was found and the plasticity of the soil under study was annulled.

Key word: Collapse, stabilization, pavement, lime, cement.

INTRODUCCIÓN

Los suelos colapsables han sido materia de estudio en los últimos años, en diversas partes del mundo como en zonas desérticas, áridas y semiáridas o en climas húmedos como América del norte y sur, África del sur y Asia central se han encontrado la existencia de estos suelos (Mitchell y Soga, 2005). Este fenómeno altera la composición del suelo, mayormente en formaciones de loes, depósitos eólicos, formaciones aluviales y residuales. Las uniones entre sus partículas son pueden llegar a ser anuladas o reducidas ante un aumento del contenido de humedad del suelo originando asentamientos significativos que provocan daños en las estructuras de obras ingenieriles construidas sobre los suelos colapsables. La presente investigación se desarrollan los criterios y metodologías para identificar y determinar el grado de colapso. Asimismo, se seleccionan los estabilizadores para mejorar las propiedades del suelo en estudio.

El Capítulo I describe el planteamiento del problema, el cual orienta, delimita y justifica el desarrollo de la presente investigación.

El Capítulo II contiene el marco teórico que sustenta el estudio, el cual menciona investigaciones relacionadas con el tema y bases teóricas.

El Capítulo III establece un sistema de hipótesis, que se presenta de forma anticipada y posteriormente es validada.

El Capítulo IV presenta la metodología de la investigación, la cual contempla el diseño, población y muestra. Además, técnicas e instrumentos de recolección de datos y técnicas para el procesamiento y análisis de la información.

El Capítulo V Expone el estudio de las propiedades del suelo, la selección tipo de estabilización, propuesta del tipo de estabilizador y análisis de resultados obtenidos en laboratorio organizados mediante tablas y gráficos estadísticos.

Finalmente, se detallan las conclusiones y recomendaciones, las cuales destacan los hallazgos más importantes del estudio y permiten dar un mayor alcance a futuras investigaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACION DEL PROBLEMA

1.1. Formulación y delimitación del problema

En la actualidad los suelos colapsables plantean retos técnicos y económicos debido a los efectos negativos que produce en el terreno generando fallas y asentamientos en las estructuras. Este tipo de suelo al incrementar su contenido de humedad y/o estar sometido a una carga cambia volumétricamente. (Redolfi, 2007) La presente investigación recopila los diferentes estudios en los últimos años con respecto al comportamiento de este suelo colapsable. Con el objetivo de mejorar y obtener mayor resistencia y durabilidad en los pavimentos, cumpliendo así los parámetros exigidos en los manuales y normativas.

Dentro de los diferentes tipos de estabilización a nivel de subrasante, se encuentran la estabilización mecánica de suelos, por combinación de suelos, por sustitución de los suelos y la estabilización con la adición de agentes estabilizadores en diferentes proporciones dependiendo de las propiedades del suelo. Dichos estabilizadores son: la cal, el cemento, escoria, cloruros, productos asfálticos, entre otros. Por lo expuesto anteriormente, debido a que existe una gran variedad de estabilizadores, esta investigación se realiza tomando de referencia la estabilización química con cemento portland y cal. Con la finalidad de determinar el nivel de mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante de un pavimento industrial en la provincia de Paita - Piura y así recomendar su aplicación.

En la localidad de Paita se han identificado seis unidades geomorfológicas que corresponden a colina, loma, tablazo, terraza marina, playa y acantilado. (Bernal & Gómez, 2019). El área de estudio se asienta en el tablazo donde desarrollan las nuevas poblaciones e industrias pesqueras, sector que es conocido comúnmente como Paita Alta. Según el Instituto geofísico del Perú (IGP) en el mapa de microzonificación sísmica-geotécnica para la ciudad de Paita, esta área es clasificada como zona tres y presenta un tipo de suelo Blando. (Ver Figura 1)

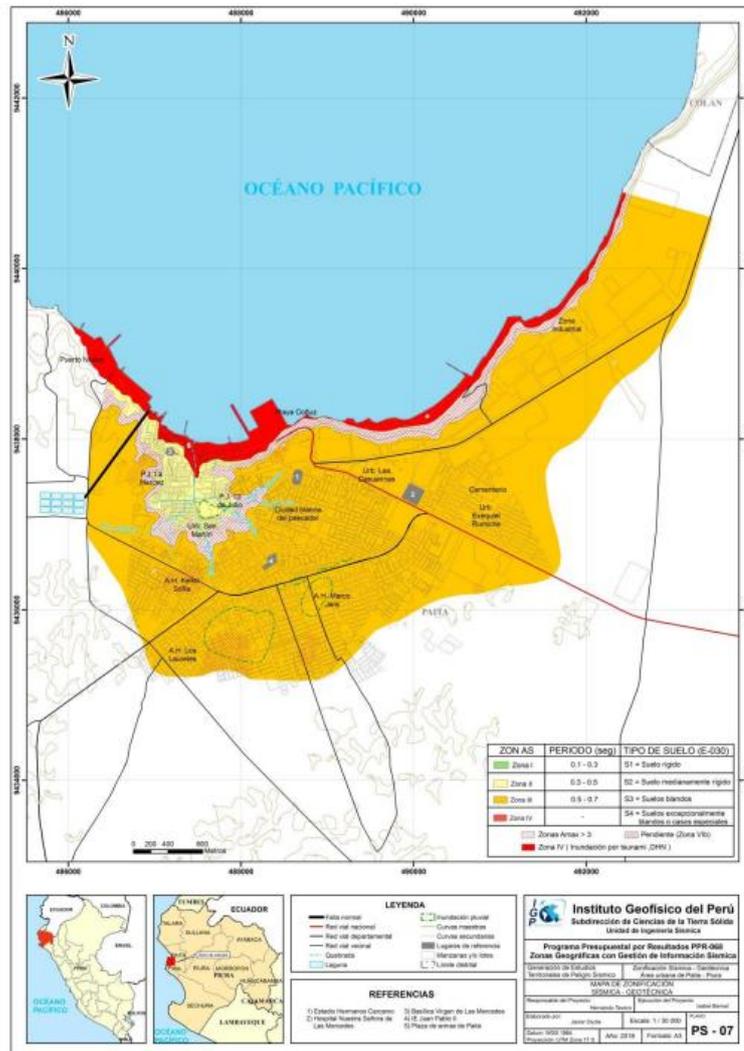


Figura 1. Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Paita.
Fuente: Instituto Geofísico del Perú

Los eventos geodinámicos que afectan la seguridad física de la población de Paita son: Inundaciones fluviales que ocurren en el sector de Paita Baja en parte del centro cívico (plaza de armas, municipalidad) y zonas aledañas por el desborde de la quebrada el Zanjón en épocas de ocurrencia de eventos Niño; inundaciones pluviales que ocurren en el sector de Paita Alta debido a las precipitaciones extremas producto de los eventos Niño y las características del terreno (depresiones mínimas) a las cual se les denomina cuencas ciegas; y los flujos de lodo que descienden por las quebradas en épocas de precipitaciones extremas (evento Niño) que confluyen a la quebrada principal El Zanjón. En el año 2017 Paita se vio afectada por los eventos mencionados anteriormente producto de la ocurrencia del evento Niño (Bernal & Gómez, 2019).

En la presente investigación el área de estudio es la zona de Paita – Alta. La cual es considerada una ciudad pesquera, debido a que a nivel macro social la actividad portuaria, es uno de los centros de sustento de la actividad económica con un valor de 20% de la PEA. (INEI, 2007). En esta zona albergan almacenes y plantas industriales, como cámaras de congelado para la conservación de productos marinos.

Según CENEPRED en su informe de “Evaluación de Riesgo por inundaciones de Paita”, la zona de Paita Alta presenta suelos colapsables que contienen sales y sulfatos conglomerados con carbonatos. Los cuales, al saturarse, debido a las altas precipitaciones de la zona, presentan cambios volumétricos que generan fallas y/o asentamientos en las estructuras. Para evitar estos efectos es recomendable controlar la humedad del suelo por fuga de tuberías de agua o desagüe, o evitar las escorrentías de las aguas pluviales, mediante un adecuado sistema de drenaje que encauce las aguas superficiales. Además, al ser una zona industrial, es importante considerar este tipo de suelo especial, para el diseño de pavimentos y construcción de futuras plantas industriales. Es necesario estudiar el comportamiento dinámico, mecánico o estado de sitio del suelo colapsable para proponer los tipos de estabilizadores que aporten mejor resistencia y durabilidad de las estructuras a través del tiempo.

1.1.1 Problema general

¿Cuáles son los tipos de estabilizadores para mejorar las propiedades físicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?

1.1.2 Problema específico

- a) ¿Cómo seleccionamos los tipos de estabilizadores según las propiedades físicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?
- b) ¿Cuáles son los estabilizadores que mejoran las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?
- c) ¿De qué modo incide el cemento como estabilizador seleccionado en las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?

1.2. Objetivo general y específico

1.2.1 Objetivo general

Determinar los tipos de estabilizadores para mejorar las propiedades físicas-mecánicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura

1.2.2 Objetivo específico

- a) Identificar las propiedades físicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.
- b) Proponer los estabilizadores que mejoran las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.
- c) Determinar la incidencia del cemento como estabilizador seleccionado en las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.

1.3. Delimitación de la investigación: temporal, espacial y temática

1.3.1 Delimitación temporal

El presente estudio se realiza en el año 2022.

1.3.2 Delimitación espacial

El área de estudio es en el departamento de Piura, provincia de Paita. La unidad geomorfológica es el Tablazo, la cual comprende el sector de Paita Alta.

1.4. Justificación e importancia

1.4.1 Justificación teórica

El aporte que brinda esta investigación es la descripción de los diferentes tipos de estabilizadores basándonos en la recopilación de los últimos artículos científicos nacionales e internacionales, libros y manuales del MTC publicados con respecto al tema. Dado que, es importante que los ingenieros proyectistas estén informados del comportamiento del suelo colapsable y la incidencia de los tipos de estabilizadores al momento de la toma de decisiones

1.4.2 Justificación metodológica

Ante la falta de trabajos sobre el tema en el Perú, el presente estudio pretende contribuir en las investigaciones efectuadas con respecto a los suelos colapsables, tomando como referencia diversas técnicas e instrumentos para el procesamiento de datos, tales como tesis pasadas, expedientes técnicos, artículos científicos, manuales internacionales y nacionales, entre otros.

1.4.3 Justificación practica

Se realiza una revisión de las diversas teorías, metodologías, trabajos experimentales; con la finalidad de estudiar los suelos colapsables. Asimismo, se determina las propiedades del suelo en estudio, mediante ensayos de laboratorio, para elegir el estabilizador que logre mejorar las propiedades física-mecánicas. Ayudando a los Ingenieros Proyectistas a que estén informados del comportamiento del suelo colapsable y la incidencia de los tipos de estabilizadores al momento de la toma de decisiones.

1.4.4 Justificación social

La zona de Paita es caracterizada por ser una de las regiones de mayor importancia para la pesca artesanal en el Perú, en donde hay zonas industriales, con cámaras de congelamiento de productos marinos. El suelo en esta zona es blando (Bernal & Gòmez, 2019) con una clasificación de suelo areno – arcilloso (SP-SC) en el área de estudio ubicada en Paita Alta. Estas propuestas de estabilización planteadas servirán como guía para su empleo en futuras construcciones de la zona y serán un aporte en la búsqueda de posibles soluciones más factibles.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio de investigación

2.1.1 Investigaciones internacionales

Ramírez, E. (2021) en la investigación titulada “Métodos para identificar suelos colapsables” tuvo como objetivo construir un estado del conocimiento sobre las diferentes técnicas y métodos experimentales para la caracterización geotécnica de suelos colapsables. Se concluye que dentro del campo geotécnico las propiedades de los suelos dependen de su proceso de formación y factores geológicos. Por lo tanto, poder identificar un suelo susceptible al colapso es difícil, ya que existen diferentes tipos de materiales y factores que ayudan a este fenómeno. Uno de los parámetros más relevantes es el incremento de agua, que provoca la anulación de las fuerzas interarticulares e induce al cambio de la estructura del suelo y en los esfuerzos, disminuyendo el volumen del suelo lo cual es un indicativo de que se presenta en fenómenos de colapso, permite estimar el colapso. La distribución del tamaño de las partículas depende de su composición mineral y el ambiente de formación. Hay una gran variedad de enfoques para medir el potencial de colapso de los suelos, incluidos los métodos de laboratorio y los métodos de campo. El método más utilizado y recomendado para la identificación de los suelos colapsables es el edómetro. La principal ventaja de este ensayo es que se pueden controlar y medir los tres factores más importantes que afectan el potencial de colapso: grado de saturación, densidad seca y esfuerzo por sobrecarga. Con el uso de esta técnica, es posible predecir el comportamiento hidrodinámico e hidrostático, acoplado a algunas variables básicas (p. ej. gradación y morfología). El comportamiento hidrodinámico está relacionado con la estructura y composición mineralógica y el hidrostático se produce por la fricción no drenada durante el movimiento y arrastre del suelo hasta alcanzar una relación de vacíos baja (colapso). A diferencia de la técnica por hidrometría convencional ya que normalmente se acierta al interpretar los resultados mediante las cartas que tienen las diferentes normas (ASTM, USCS). Esta técnica también es económica y fácil de conseguir. Sin embargo, para que los resultados sean confiables es necesario tener un riguroso control en el momento del ensayo.

Quijano, D. & Tenjo, E. (2018) en la investigación titulada “Análisis de efectividad en la estabilización de suelos colapsables en el tramo II de la transversal del bosque en el municipio de Floridablanca, Santander” menciona que los suelos colapsables se caracterizan por tener valores bajos de cohesión, y presentar relaciones de vacíos altas, y dado que sus partículas están unidas entre sí por fuerzas o materiales cementantes que son susceptibles, tanto unos y otros pueden ser anulados o reducidos cuando aumenta el contenido de humedad del suelo. Los suelos Colapsables en estudio tenían un índice de colapso del orden de 6.05 a 8.13 y un grado de colapsabilidad moderado a moderadamente alto. Se analizaron tres métodos para su estabilización: mejoramiento mecánico con material granular, pre humedecimiento del suelo hasta superar la humedad óptima de compactación e inclusión de cal en porcentajes de 5% y 7%. Concluyendo que el método más eficaz para la estabilización del suelo en estudio es la pre humectación del material. Aplicando este método el índice de colapso se redujo en un 91.90%, siendo el nuevo índice de colapso clasificado como ligero. Estos autores recomiendan tener en cuenta la presencia de agua y su debido direccionamiento, ya que este es el factor más importante para estimular el colapso.

Bahmyari, H., Ajdari, M. & Vakili, A. (2021) en el Paper titulado “The Role of the Cement, Lime, and Natural Pozzolan” se estudió el grado de colapsabilidad en diferentes estructuras iniciales del suelo con el objetivo de evaluar sus parámetros de resistencia al corte. También se analizó los efectos de los estabilizadores con cal, cemento y puzolana natural en la respuesta mecánica del suelo colapsable considerando el tiempo de curado. Concluyeron que el potencial de colapso del suelo se ve más afectado por el contenido inicial de agua que por la densidad seca. La cal y cemento mostraron un mejor rendimiento en la reducción del grado de colapsabilidad del suelo que la puzolana natural. Siendo el porcentaje óptimo de cal y cemento para controlar la colapsabilidad del 5% en peso. El índice de plasticidad del suelo tratado disminuyó un promedio del 10% con el aumento del tiempo de curado, por lo que se recomienda un tiempo de curado de 14 días para reducir al máximo el potencial de colapso. El estabilizador con mejores resultados fue el Cemento dado que los parámetros de resistencia al

corte no drenado del suelo colapsable después de un tiempo de curado de 1 día aumentaron notablemente.

Shakir, M. & Jamal, M. (2020) en el Paper titulado “A Review of Collapsible Soils Behavior and Prediction” determino que los factores afectan al comportamiento del suelo colapsable son la relación de vacío inicial, el contenido de humedad inicial, la presión de remojo, la cementación, el grado de adherencia, la succión inicial, la tensión vertical aplicada y la duración de la carga sostenida. Hay dos tipos principales de colapso del suelo, el primero está relacionado con el enfoque macro mecánico, que incluye, la humectación, la carga, la fluencia, el exceso de presión de agua de los poros y el reblandecimiento radial, y el segundo el enfoque micro mecánico, que incluye el aplastamiento de los granos, el desbordamiento, el ablandamiento y el endurecimiento transición del tejido.

S., Akbari, A., Reza, H., Chandrakant. S, , M. (2019) en el Paper titulado “Testing and Constitutive Modeling of Lime-Stabilized Collapsible Loess. I: Experimental Investigations ” se investigó el efecto de la adición de la cal a un suelo colapsable no saturado en especímenes reconstituidos con 1% y 3% utilizando micrografías SEM, SWRC y un odómetro no saturado para obtener información sobre el comportamiento hidromecánico de los suelos colapsables estabilizados con cal. En los resultados revelaron que la adición de cal al suelo colapsable aumentaría significativamente su agua, aumentando el grado de saturación hasta un 4.4% y 13.5%. También la micrografías SEM revelaron que la adición de cal cambia la estructura de los poros de tal manera que las dimensiones y diámetros de los poros del suelo disminuyen , en consecuencia su capacidad de retención de agua aumenta debido a la acumulación de cal alrededor de los iones de arcilla cargados negativamente y desarrolla la floculación de partículas finas del suelo.

2.1.2 Investigaciones nacionales

Torres, N. (2019) en su tesis de pregrado “Incidencia del grado de saturación de los suelos colapsables en la estabilidad de taludes del puerto de Paita-Piura”, en el que afirma que la incidencia del grado de saturación de los suelos colapsables en la estabilidad de taludes es altamente significativa y que suelos colapsables disminuyen su cohesión al entrar en contacto con el agua, esto a su vez ocasiona la reducción de factor de seguridad en el talud propuesto. Y concluye de los resultados de laboratorio que estos suelos pudieron ser identificados por sus propiedades índices, ya que presentaron las características típicas de un suelo colapsable como una elevada relación de vacíos (e) que varió entre 0.76 hasta 1.17, porosidades mayores a 0.4, densidad seca: 11.96-14.70 KN/m³, un contenido de arena menor al 15%, límites líquidos debajo de 45 y límite plástico por debajo de 25. Además, para un grado de saturación de 95.13%, la cohesión y el ángulo de fricción se redujeron en 32% y 24% en relación a los parámetros iniciales de resistencia para un grado de saturación natural (5.72%).

Ccalla, G. & Zegarra, G. (2021) en su tesis de pregrado “Evaluación del potencial de colapso en los suelos derivados de cenizas volcánicas en el distrito de Calana – Tacna 2021” tuvo como objetivo establecer las características físicas y químicas determinantes en los suelos, así como determinar el potencial de colapso de los suelos derivados de cenizas volcánicas. Por consiguiente, se realizó ensayos de laboratorio en 5 calicatas donde se halló ceniza volcánica que fue clasificada como una Arena limosa (SM), en el cual muestra la relación entre suelos colapsables y no colapsables en función de los parámetros de límite líquido (LL) y densidad natural seca. Con los datos obtenidos del estudio se concluyó que la relación existente entre el colapso y densidad seca es inversamente proporcional, así mismo, la relación entre el límite líquido y densidad seca da como resultado un suelo colapsable. Se determinó de igual manera que la colapsabilidad o potencial de colapso tiene una relación directamente proporcional al contenido de sales solubles.

Caceda, E. (2017) en su tesis de pregrado “Mejoramiento del suelo colapsable con fines de cimentación mezclando cemento diluido en agua en el Asentamiento Humano Magdalena Nueva – Chimbote 2017”, tuvo como objetivo determinar el mejoramiento del suelo colapsable con fines de cimentación mezclando cemento diluido en agua. Por consiguiente, se realizó ensayos de laboratorio en 10 calicatas donde se halló un tipo de suelo SP según SUCS. Se concluye que el terreno natural sin mejoramiento presenta una densidad máxima seca de 1.890 g/cm³ con un contenido de humedad de 10.70% y que al agregarle cemento diluido en agua al 10% con un contenido de agua de 0.7, mejoran los suelos colapsables teniendo como resultado un incremento en la densidad seca máxima de 1.996 g/cm³ con un contenido de humedad de 11.50%. También incremento el ángulo de fricción en 25° con una cohesión de 0.02kg/cm² se verifico en el ensayo de laboratorio que tuvo más resistencia al esfuerzo cortante.

Cañi, G. (2020) en su tesis de pregrado “Caracterización y evaluación del potencial de colapso de suelos derivados de la ceniza volcánica para prevenir problemas en cimentaciones superficiales en el distrito alto de la alianza - Tacna”, tuvo como objetivo determinar las características y evaluación del potencial de colapso para prevenir problemas en cimentaciones superficiales. Por consiguiente, mediante la caracterización, delimitación del suelo y los ensayos de laboratorio se estableció sus propiedades físicas, mecánicas, químicas y la medición del potencial de colapso de suelo se determinó que el suelo derivado de la ceniza volcánica es un suelo no colapsable. En los análisis químicos de suelos se presenta un grado “severo” en ataque de sulfatos, “perjudicial” para contenido de cloruros y en concentraciones de sales solubles totales, por lo que existirá un ataque químico al concreto. El suelo derivado de la ceniza volcánica que se encuentra en el distrito Alto de la Alianza presenta un suelo de colapso moderado (suelo no colapsable), permitiendo apoyar las cimentaciones en este tipo de suelo. Los resultados del índice de colapso a una carga de 1.00 kg/cm² (Ic) es de 3.5 – 5.2%. Al ser estos resultados muy próximos a suelos colapsable, tener en consideración un mejoramiento de suelos

Flores A. (2018) en su tesis de maestría “Determinación del tipo de suelo y potencial de colapso del suelo del puesto de salud Intiorko distrito de ciudad nueva, departamento de Tacna-2017” Se investigó el tipo de suelo y potencial de colapso del suelo del Puesto de Salud Intiorko. Por consiguiente, se desarrolló ensayos estándares para la identificación de suelos colapsables, así como ensayos de colapso en laboratorio. Se identificó que las propiedades físicas, mecánicas y químicas contribuyen a la estructura colapsable del suelo, esto debido a la baja densidad natural, límite líquido, alta relación de vacíos y sales solubles totales Arena Limosa (SM), límite líquido menor a 30%, no presenta límite plástico, contenido de humedad menor al 5%, densidad relativa menor al 40%, gravedad específica de los sólidos alrededor de 2.60 gr/cm³). Se determinó que a la presión de 1.00 kg/cm² no se genera problemas de colapso, mientras que con 2.00 kg/cm² el problema es moderado. En conclusión, considerando las características físicas del suelo bajo análisis, se determinó cualitativamente que el suelo es colapsable, debido básicamente a su baja densidad natural y por tanto elevada relación de vacíos, reducido límite líquido, así como su variable contenida de sales solubles totales, el cual es directamente proporcional al potencial de colapso.

2.2. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

A continuación, se presenta los fundamentos teóricos y científicos de las variables suelos colapsables y estabilizadores de suelos.

2.2.1 Estabilización del suelo

a) Definición

Según la MTC (2014) lo define como “el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos” (p.92).

La estabilización de suelos, también denominada mejoramiento de suelos, es definida por Das (2015) como el “proceso de alteración de las propiedades de ingeniería de suelo in situ o tomado a un costo más bajo y con mejor control de calidad” (p.266).

b) Criterios y factores para establecer la estabilización de suelos

Según el Manual de Carreteras Sección Suelos y Pavimentos - MTC (2014) se formalizan algunos conceptos para establecer la estabilización de suelos.

- Cuando la capa de la subrasante tiene un C.B.R. < 6 %, o se presenten zonas húmedas o áreas blandas, esta será materia de un estudio especial para estabilización.
- Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas.
- Los factores que se consideran al seleccionar el método más conveniente de estabilización son:
 - Tipo de suelo a estabilizar y el uso propuesto.
 - Tipo de aditivo estabilizador y la experiencia en su aplicación.
 - Disponibilidad del tipo de aditivo estabilizador
 - Disponibilidad del equipo adecuado
 - Costos comparativos

c) Tipos de estabilización de suelos

Existen diversos tipos de estabilización de suelos. Estos se clasifican en función de su incidencia en las propiedades y el comportamiento del suelo, colocándose en dos categorías principales.

Estabilización física – mecánica

- Estabilización por compactación

Según Ramírez (2018) “Es el método más conocido, en el cual las propiedades del suelo se mejoran a partir de ejercer una acción mecánica de corta duración de manera repetitiva sobre la masa de suelo parcialmente saturado, utilizando equipos llamados compactadores”.

Al compactar un suelo se obtiene:

- Mayor densidad, por lo que tendremos una mejor distribución de fuerzas que actúan sobre el suelo.
- Mayor estabilidad, pues al no compactar un suelo se tendrán asentamientos desiguales por lo tanto inestabilidad de la estructura.

- Disminución de la contracción del suelo, al existir espacios vacíos, provocando en suelos arcillosos la contracción y dilatación del suelo y por último ocasionará una disminución de los asentamientos.

“Para asegurar una buena compactación deben realizarse pruebas de terreno, para definir qué equipo será el mejor para el tipo de material, el espesor de capas, el número de pasadas para cumplir con todas las especificaciones técnicas de densidad seca” (Romero, R. & Sañac, C. 2016).

“Para efectos de la compactación, los suelos se dividen en dos grupos, suelos granulares y suelos finos. En la siguiente imagen se muestran las características entre cada tipo de suelo y el método de compactación recomendado para cada uno” (Romero, R. & Sañac, C. 2016). (Ver Figura 2).

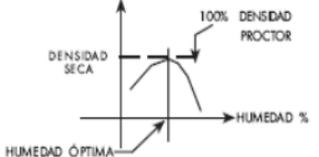
Tipo de suelos	Características	Compactación
Suelo granular	Suelo formado por gravas y arenas limpias o con pocos finos (menor a 5%)	Se compactan totalmente secos o con abundante agua.
Suelo fino	Suelo gravosos o arenosa con más de un 12% de finos, o bien, suelo netamente fino.	Se compactan con humedad. La humedad óptima se determina con el ensayo Proctor.
		

Figura 2. Características del tipo de suelo y método de compactación

Fuente: “Universidad Andina del Cuzco”, por R’ Romero & C’ Sañac. (2016, p.54)

- Estabilización con geosintéticos

A diferencia de los suelos, los geosintéticos proporcionan resistencia a la tracción y una mejora significativa en el rendimiento y construcción de pavimentos (MTC, 2014).

Los geosintéticos contribuyen significativamente al buen desempeño de los pavimentos, cumpliendo funciones de separación, filtración, refuerzo, rigidización, drenaje, barrera y protección. Entre las aplicaciones más importantes para proyectos viales se encuentran la estabilización a nivel base y subrasante, reducción de la contaminación de materiales de capas diferentes, disminución del contenido de humedad, mitigación de agrietamiento reflectante en sobre carpetas de asfalto y disminución de

problemas asociados con la presencia de arcillas expansivas (cargas ambientales). (Zornberg, 2019)

Los suelos colapsables se caracterizan por presentar cambios volumétricos significativos al incrementarse el contenido de Humedad. Por consiguiente, la presencia de humedad en la capa base o subrasante del pavimento es perjudicial, pues compromete las propiedades mecánicas de los suelos colapsables. Una alternativa para estabilizar este suelo especial, es impermeabilizarlo utilizando la Geomembrana.

La geomembrana es una lámina delgada de caucho o material plástico, cuya función principal es ser una barrera relativamente impermeable. Se utiliza principalmente para recubrir y tapar las instalaciones de almacenaje de sólidos o líquidos.

En la siguiente imagen se visualiza el uso de un geosintético con capacidad de drenaje interno en su plano. Se colocó un drenaje geosintético horizontal directamente bajo la carretera, el cual desvía lateralmente la humedad que pueda haber alcanzado la base a través de infiltración descendente resultado de la presencia de grietas en la carpeta asfáltica. El geosintético también puede minimizar la humedad en suelos de la subrasante subyacente, que puede haber alcanzado un alto grado de saturación, por ejemplo, a través del ascenso capilar debido a la presencia de un nivel freático relativamente elevado. (Zornberg, 2019). A continuación se observa una carretera diseñada sin geosintéticos y una diseñada con geosintéticos (Ver Figura 3)

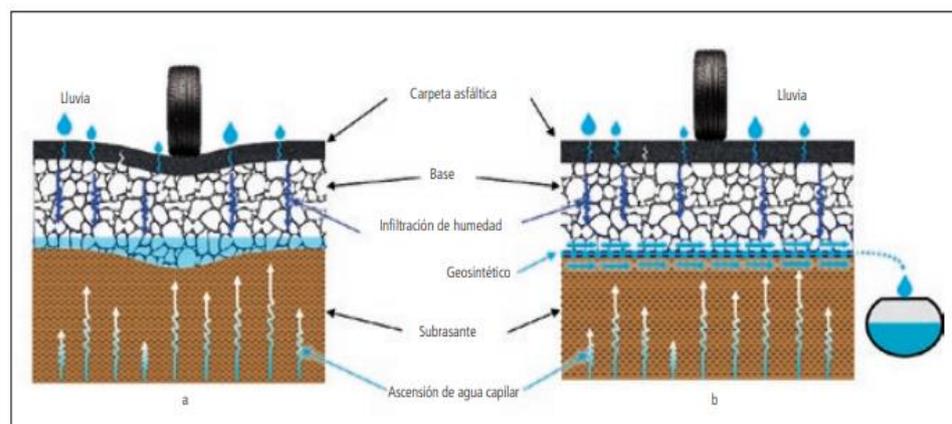


Figura 3. Uso de geosintéticos para disminuir el contenido de humedad
Fuente: “Funciones y aplicaciones de geosintéticos en carreteras”, J’ Zornberg. (2019, p.34)

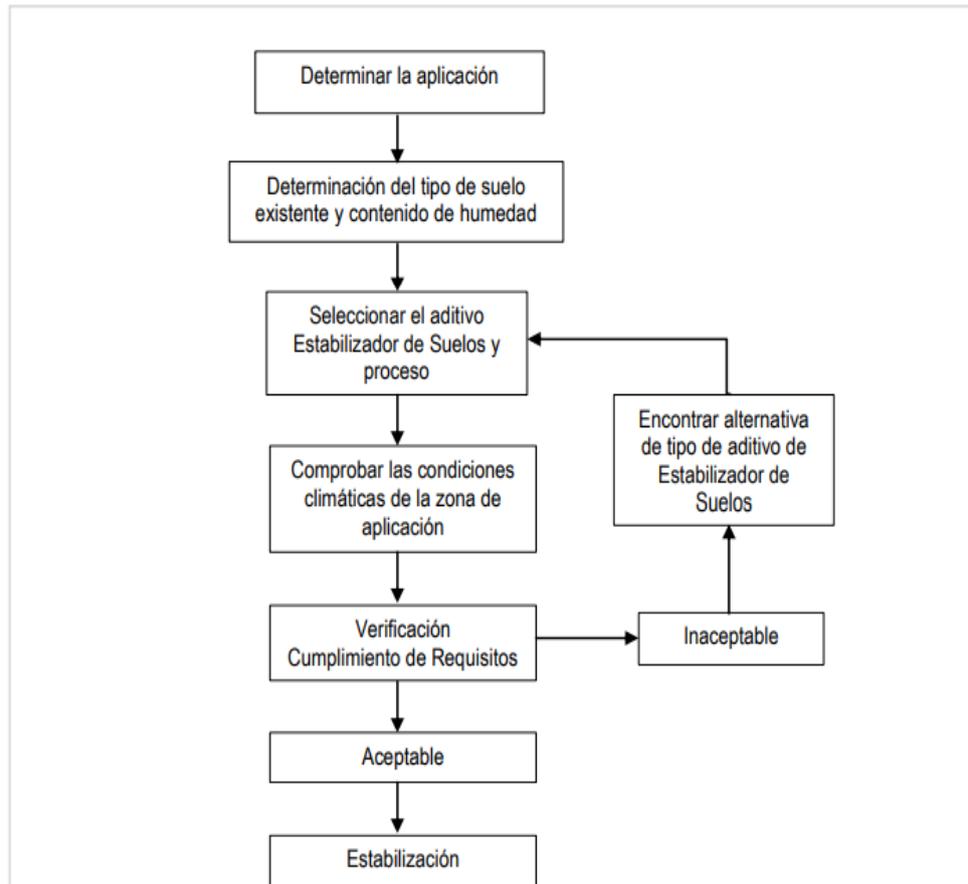


Figura 4. Proceso de selección del Tipo de Estabilización

Fuente: “Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos “, por MTC. (2014, p.91)

Estabilización química

La estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, el cual se debe combinar íntima y homogéneamente con el terreno a tratar, respetando los tiempos de curado de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. (MTC, 2004)

Según MTC se debe seguir un proceso de selección del tipo de estabilizador para seleccionar el aditivo cumpliendo con los requisitos establecidos. (Ver Figura 4)

El MTC presenta unas guías referenciales para la selección del tipo de estabilizador según la clase de suelo, el límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP) y porcentaje que pasa la malla 200. (Ver Figura 1). Asimismo, se muestra rangos de dosificación y tiempo de curado. (Ver Figura 2).

Área	Clase de suelo	Tipo de Estabilizador Recomendado		Restricción en LL e IP del suelo	Restricción en el porcentaje que pasa la malla 200	Observaciones
1 A	SW o SP	(1)	Asfalto			
		(2)	Cemento Portland			
		(3)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 B	SW - SM o SP - SM o SW - SC o SP - PC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10		
		(2)	Cemento Portland	IP no excede de 30		
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 C	SM o SC o SM-SC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	
		(2)	Cemento Portland	(b)		
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 A	GW o GP	(1)	Asfalto			Solamente material bien graduado.
		(2)	Cemento Portland			El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 B	GW - GM o GP - GM o GW - GC o GP-GC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10		Solamente material bien graduado.
		(2)	Cemento Portland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 C	GM o GC o GM - GC	(1)	Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	Solamente material bien graduado.
		(2)	Cemento Portland	(b)		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3)	Cal	IP no menor de 12		
		(4)	Cal-Cemento-Ceniza	IP no excede de 25		
3	CH o CL o MH o ML o OH o OL o ML-CL	(1)	Cemento Portland	LL no menor de 40 IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2)	Cal	IP no menor de 12		
IP = índice Plástico (b) $IP = 20 + (50 - \text{porcentaje que pasa la Malla N° 200}) / 4$				Sin restricción u observación No es necesario aditivo estabilizador	Fuente: US Army Corps of Engineers	

Figura 5. Guía Referencial para la Selección del Tipo de Estabilizador
Fuente: “Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos “, por MTC. (2014, p.92)

Tipo de Estabilizador Recomendado	Normas Técnicas	Suelo ⁽¹⁾	Dosificación ⁽²⁾	Curado (Apertura Al Tránsito) ⁽³⁾	Observaciones
Cemento	EG-CBT-2008 Sección 3068 ASTM C150 AASHTO M85	A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7 LL > 40% IP ≥ 18% CMO ⁽²⁾ < 1.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.2% Abrasión < 50% Durabilidad SO ₄ Ca ⁽⁴⁾ - AF ≤ 10%	2 - 12%	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association)
Emulsión	ASTM D2397 o AASHTO M208	A-1, A-2 y A3 Pasante malla Nº 200 ≤ 10% IP ≤ 8% Equiv. Arena ≥ 40% CMO ⁽²⁾ < 1.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.6% Abrasión < 50%	4 - 8%	Mínimo 24 horas	Cantidad de aplicación a ser definida de acuerdo a resultados del ensayo Marshall modificado o Illinois
Cal	EG-CBT-2008 Sección 3078 AASHTO M216 ASTM C977	A-2-6, A-2-7, A-6 y A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMO ⁽²⁾ < 3.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.2% Abrasión < 50%	2 - 8%	Mínimo 72 horas	Para IP > 50%, se puede aplicar cal en dos etapas. Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma ASTM D 6276
Cloruro de Calcio	ASTM D98 ASTM D345 ASTM E449 MTC E 1109	A-1, A-2, y A-3 IP ≤ 15% CMO ⁽²⁾ < 3.0% Sulfatos (SO ₄ ²⁻) < 0.2% Abrasión < 50%	1 a 3% en peso del suelo seco	24 horas	
Cloruro de Sodio	EG-CBT-2008 Sección 309B ASTM E534 MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 8% ≤ IP ≤ 15% CMO ⁽²⁾ < 3.0% Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m ³	07 días	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba
Cloruro de Magnesio	MTC E 1109	A-1, A-2 y A-3 IP ≤ 15% CMO ⁽²⁾ < 3.0% pH: mínimo 5 Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m ³	48 horas	La cantidad de sal depende de los resultados de laboratorio (dosificación) y tramo de prueba
Enzimas	EG-CBT-2008 Sección 308B MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 6% ≤ IP ≤ 15% 4.5 < pH < 8.5 CMO ⁽²⁾ No debe contener Abrasión < 50% % < Nº 200: 10 - 35%	1L / 30-33 m ³	De acuerdo a Especificaciones del fabricante	
Aceltes sulfonados		Aplicable en suelos con partículas finas limosas o arcillosas, con LL bajo, arcillas y limos muy plásticos CMO ⁽²⁾ < 1.0% Abrasión < 50%		De acuerdo a Especificaciones del fabricante	

Figura 6. Guía Complementaria para la Selección del Tipo de Estabilizador
Fuente: “Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos“, por MTC. (2014, p.93)

- Estabilización del suelo con cal

Según Alonso Montejo (2002) en su libro “Ingeniería de Pavimentos para Carreteras”, la estabilización de suelos con cal sigue el propósito general que realizan en este tipo de investigaciones de mejorar las propiedades naturales del suelo con el objetivo de aumentar su capacidad para resistir las cargas de tránsito vehicular (esfuerzos de corte) y las variaciones volumétricas en diferentes situaciones de clima.

“La cal se adapta perfectamente en la mayoría de los casos para lograr positivos resultados, y su empleo suele ser conveniente por tratarse de un producto de costo moderado, de fácil manejo, así como de producción fácil y abundante”. (Montejo, 2002, p.100)

Se considera más pragmático usar la cal para un índice de plasticidad del suelo mayor de 15 y con relación a la granulometría se usa cal cuando se obtiene un porcentaje que pasa del tamiz número 200 mayor de 25. Sin embargo, la cal es poco efectiva en suelos altamente orgánicos o con pocas cantidades de arcilla capaz de reaccionar con la cal. (Montejo, 2002).

“La cal generalmente produce una disminución en la densidad de los suelos, modifica la plasticidad, y aumenta la capacidad soporte y resistencia al corte del material y reduce su hinchamiento” (Montejo, 2002, p.104).

Influencia de la cal en las propiedades físicas – límites de consistencia:

La cal modifica la plasticidad del suelo significativamente, para suelos con índices plásticos inferiores a 15 la cal aumenta el límite líquido de tal manera que el índice plástico se altera incrementando levemente. Para suelos plásticos ($IP > 15$) la cal comúnmente disminuye el límite líquido e incrementa el límite plástico, por consiguiente, el índice plástico reduce. (Montejo, 2002).

Influencia sobre la densidad seca:

“Si se compacta una mezcla de suelo cal se obtiene por lo general una densidad seca menor que el correspondiente al suelo solo, para las mismas condiciones de compactación. Esta disminución puede alcanzar hasta un 5%” (Montejo, 2002).

“La reducción anotada en la densidad puede explicarse por el efecto de la cal sobre la textura del suelo” (Montejo, 2002, p.105).

Cuando se adiciona la cal la relación de la resistencia del suelo con su densidad es en la mayoría de casos, inversamente proporcional. La cal es un

agente químico que se le agrega al suelo natural por ello se forma un nuevo material con diferentes propiedades físicas y químicas. Por lo tanto, aunque el suelo no tratado se encuentre más densificado la densidad máxima puede tener mayor resistencia (Montejo, 2002).

Propiedades que se obtienen después de una estabilización con cal:

Según la National Lime Association, citado por Mendez (2020) “resume las propiedades que se obtienen después de una estabilización o mejoramiento con cal, en lo siguiente”:

- Reducción del índice de plasticidad, debido a una reducción del límite líquido y a un incremento del límite plástico.
- Reducción considerable del ligante natural del suelo por aglomeración de partículas.
- Obtención de un material más trabajable y fiable como producto de la reducción del contenido de agua en los suelos (rotura fácil de grumos).
- La cal ayuda a secar los suelos húmedos lo que acelera su compactación.
- Reducción importante del potencial de contracción y del potencial de hinchamiento.
- Incremento de la resistencia a la compresión simple de la mezcla posterior al tiempo de curado alcanzando en algunos casos hasta un 40% de incremento.
- Incremento de la capacidad portante del suelo (CBR).
- Incremento de la resistencia a la tracción del suelo.

El proceso de la acción de la cal que afecta al suelo es su reacción con los componentes del mismo para formar nuevos productos químicos. Los componentes fundamentales que reaccionan con la cal son la alúmina y la sílice. Esta reacción conocida como “acción puzolánica” se prolonga en la acción del periodo y si se requiere una mayor resistencia las mezclas de suelo y cal deben estar curadas durante determinados lapsos de periodos (Montejo, 2002).

“El grado al cual la cal reacciona con el suelo depende de ciertas variables tales como cantidad de cal, clase de suelo y período de tiempo del curado de la mezcla suelo-cal” (Montejo, 2002, p.104).

Determinación del porcentaje óptimo de cal:

La dosis óptima de cal para estabilizar un suelo es el porcentaje inferior capaz de modificar las propiedades del suelo, esto beneficia al suelo aumentando su resistencia a los esfuerzos normales y tangenciales. La paridad de los resultados debe hacerse entre los valores correspondientes al suelo solo mezclado con diferentes porcentajes de cal (Montejo, 2002).

“La elección de la cantidad óptima recaerá en el menor porcentaje incorporado al suelo, capaz de conferirle las propiedades buscadas” (Montejo, 2002, p.107).

“Una vez seleccionado dicho porcentaje es aconsejable, por razones prácticas adicionarle un 0.5% al 1 % para tener en cuenta los desperdicios, inevitables durante las operaciones constructivas” (Montejo, 2002, p.107).

- Estabilización del suelo con cemento

“Aplicable para estabilizar suelos arcillosos de baja plasticidad, suelos arenosos y suelos granulares con el objetivo de aportarles mayor resistencia” (Romero, R. & Sañac, C. 2016).

“Consiste en la construcción de una o más capas de suelos estabilizados con cemento Portland, de acuerdo con las especificaciones técnicas, así como de las dimensiones, alineamientos y secciones transversales indicados en el Proyecto” (MTC, 2014).

La mezcla del suelo cemento se obtiene por una combinación íntima de un suelo evidentemente segregado con cemento, agua y otras agregaciones, seguida de una compactación y un curado adecuados. Por ende, el material tratado se transforma en otro material concreto, mucho más resistente (Méndez, 2020).

Los factores que afectan la mezcla de suelo-cemento según Montejo (2002) son:

- El tipo de suelo
- La cantidad de cemento
- La cantidad de agua que se agrega a la mezcla
- La compactación de la mezcla y curado

Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los granulares tipos A-1, A-2 y A-3, con finos de plasticidad baja o media ($LL < 40$, $IP < 18$)

Cuando se añade cemento a un suelo y antes de iniciar su fraguado el IP disminuye, su LL varía ligeramente, así como su densidad máxima y humedad óptima aumentan o disminuyen levemente. (MTC, 2008)

Según experiencias de laboratorio, el tiempo de curado influye en la resistencia a compresión de la mezcla de suelo-cemento. La resistencia aumenta a medida que se prolonga el tiempo de curado al que se somete la mezcla después de ser compactada.

A continuación, según el MTC se presenta rangos de dosificación de cemento requerido en función del tipo de suelo. (Ver Figura 7)

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido Porcentaje del peso de los suelos
A-1-a	3 – 5
A-1-b	5 – 8
A-2	5 – 9
A-3	7 – 11
A-4	7 – 12
A-5	8 – 13
A-6	9 – 15
A-7	10 - 16

Figura 7. Rango usual de cemento requerido

Fuente: “Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito” por MTC. (2008, p.160)

2.2.2 Propiedades de los suelos colapsables

Los valores de Límites de Atterberg, en conjunto con otras propiedades del suelo se utilizan ampliamente para identificar los suelos colapsables. Según Knodel (1992) manifiesta que existen variedades de factores y condiciones que se presentan en estos suelos, sin embargo, las siguientes propiedades pueden ser aplicadas de manera general.

Análisis granulométrico

“El objetivo principal de la granulometría es determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de suelo” (Briones, M. e Irigoín, N. 2015)

La susceptibilidad al colapso se ve relacionada a diversos factores como la mineralogía, el porcentaje de arcilla, la forma de granos, la distribución del tamaño del grano entre otras. Dado que la disminución de la resistencia es más inmediata cuando los granos se mantienen unidos por succión capilar, lenta en el caso de cementación química y mucho más lenta en los casos de

contrafuertes de arcilla. De tal modo, que pueden pasar largos periodos de años hasta que se produzca el colapso total. (Knodel, 1992)

Redolfi, (2007) refiere a estos suelos colapsables con granulometría predominante fina, generalmente pobremente gradada, cuyos granos más grandes están escasamente meteorizados. Los cuales contienen fracciones de limos y arcillas significantes y en algunos casos escasas. No obstante, la fracción de arcilla en grandes o carentes proporciones influye significativamente en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular del suelo.

Análisis granulométrico por tamizado

“El análisis de tamiz consiste en agitar la muestra de suelo a través de un conjunto de tamices que tienen aberturas más pequeñas progresivamente” (MTC, 2014).

En la figura siguiente se muestra la curva granulométrica.

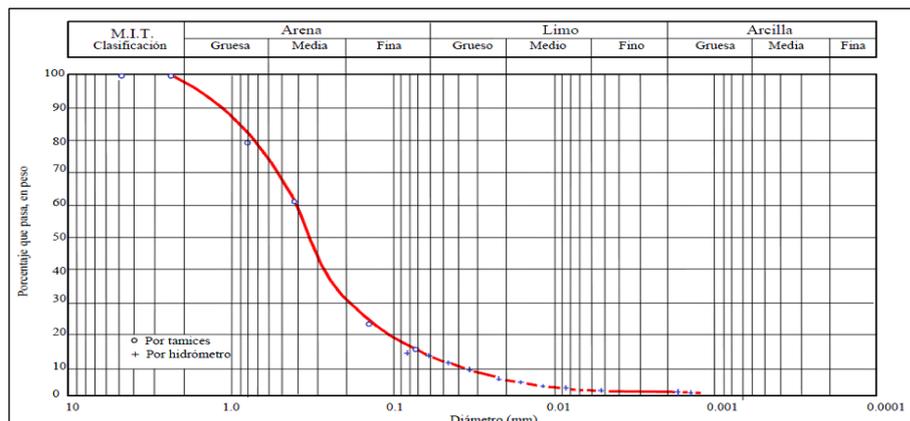


Figura 8. Curva granulométrica
Fuente: Lambe (1955)

Límites de consistencia

Plasticidad

Según Badillo, J. (2014), explica que la deformación sin agrietamiento como definición de la plasticidad no resulta suficiente ya que una arena fina y húmeda tiene esas características cuando la deformación se produce lentamente y, sin embargo, no es plástica. Existe un importante contraste entre el comportamiento de la arcilla y el de la arena: el volumen de la arcilla se mantiene constante durante la deformación, mientras que el de la arena cambia; además, la arena se desploma en deformación rápida.

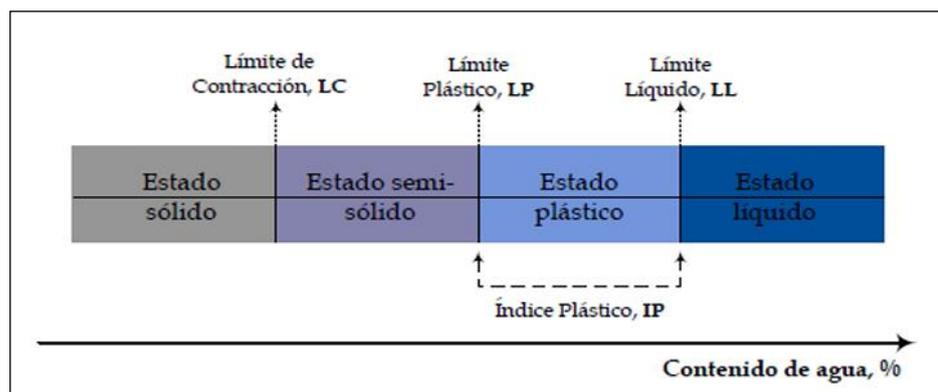


Figura 9. Esquema de la consistencia del suelo
Fuente: Briones, M. e Irigoín, N. (2015)

Límite líquido

“Es el contenido de humedad representado por el porcentaje, donde el suelo se sitúa en el límite de los estados líquido y plástico”. (Norma Técnica Peruana 339.129, 2014).

“El límite líquido es un contenido de agua, determinado por una prueba estándar de laboratorio (Límites de Atterberg), que representa la condición más débil del suelo o la condición en la que se aproxima al estado líquido”. (Knodel, 1992, p. 4)

Para la prueba de límite líquido, se añade una pasta de suelo en la copa y se hace un tajo en el centro de la pasta del suelo, para ello se usa el instrumento del ranurador estándar. Entonces la copa se asciende con la leva accionada por la manivela y se deja sentar desde una altura de 10mm. El contenido de humedad, que se va requerir para poder tapar una longitud de 12.7mm con un número de 25 golpes a lo largo de la parte baja de la ranura en porcentaje se conoce como el límite líquido (Das, 2015).

Límite plástico

El contenido de humedad, expresado en porcentaje, para el cual el suelo se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido” (Norma Técnica Peruana 339.129, 2014).

También se define en términos de porcentaje como el suelo que al enrollarse en hilos de 3.2mm de diámetro se despedaza. El límite líquido es el límite inferior del estado plástico del suelo. Para la prueba de límite plástico se manipula la muestra de masa de tierra de tamaño elipsoide mediante rodados consecutivos sobre una plancha de vidrio esmerilado (Das, 2015).

Índice de plasticidad

“El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo” (Das, 2015).

$$I.P = L.L - L.P$$

Donde:

L.L.: Límite Líquido

L.P.: Límite Plástico

I.P.: Índice Plasticidad

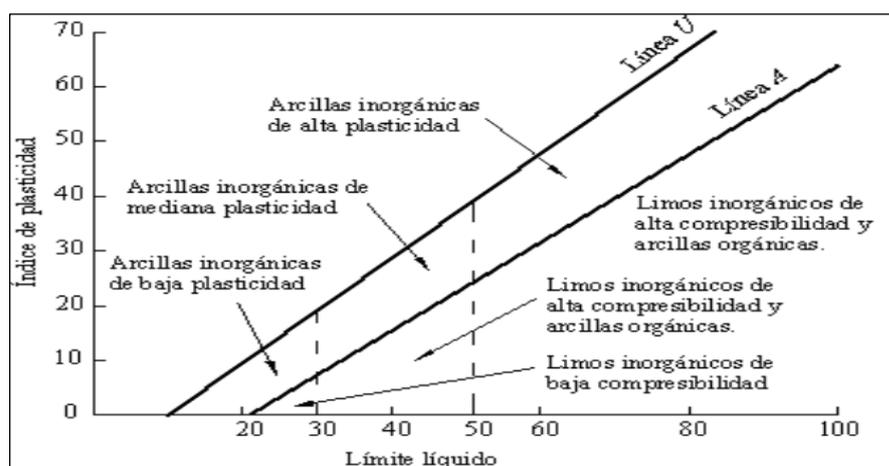


Figura 10. Carta de plasticidad de Casagrande
Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014)

“Muchos suelos colapsados tienen límites líquidos por debajo de 45 e índices de plasticidad por debajo de 25, y normalmente muchos más bajos, a menudo en el rango no plástico” (Knodel, 1992, p. 2).

Clasificación del suelo

La ingeniería de suelos estableció diferentes métodos para la clasificación de los suelos considerando que en la naturaleza predomina una gran mixtura de suelos. Cada uno de estos métodos son dependientes del área de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. Los métodos más usados en la actualidad para la clasificación de los suelos para diferentes estudios como por ejemplo el diseño de pavimentos rígidos y flexibles son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASH[1]TO) y el Unified Soil Classification System, conocido como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.CS.) (Montejo, 2002).

Según Romero, R. & Sañac, C. (2016) consideran que la clasificación que explica y precisa las propiedades de un suelo a ser usado como subrasante es

la clasificación de AASHTO M-145: la granulometría y plasticidad como principales variables en términos generales, un suelo acorde a su granulometría se expresa de la siguiente manera:

“la clasificación de los suelos es un indicador de las propiedades físico mecánicas que tienen los suelos” (Romero, R. & Sañac, C. 2016).

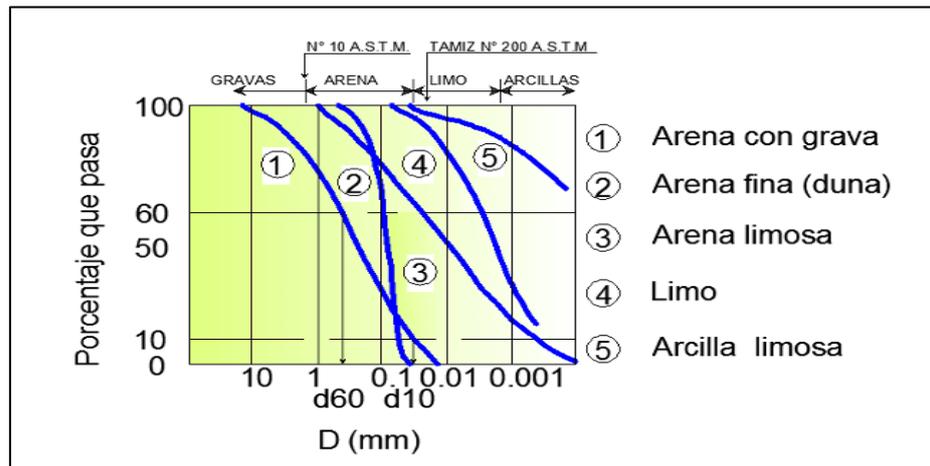


Figura 11. Clasificación de suelos en función de la granulometría.
Fuente: Briones, M. e Irigoín, N. (2015)

Sistema de clasificación AASHTO

“De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8”. (Alonso Montejo, 2002)

En el sistema tipo AASHTO existe la clasificación en suelos inorgánicos que se dividen en 7 grupos que van del A-1 al A-7. Estos de igual forma se fraccionan en un total de 12 subgrupos. Se debe tener en cuenta que los suelos con un nivel alto de materia orgánica se clasifican como A-8 (Alonso Montejo, 2002).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...		B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.		B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

Figura 12. Cuadro de clasificación AASHTO
Fuente: Crespo Villalaz (Mecánica de Suelos y Cimentaciones (1980))

Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos (Montejo, 2002)

Esta clasificación divide los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos

DIVISIÓN MAYOR		NOMBRES TÍPICOS		CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO			
SUELOS DE PARTICULAS GRISESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 (φ)	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	GRAVAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD C_u : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA C_c : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} D_{60})$ NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW. LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O IP. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON IP. MAYOR QUE 7. $C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} D_{60})$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O IP. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON IP. MAYOR QUE 7.		
		GRAVAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo			
		GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla			
		ARENAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas	SW	Areñas bien graduadas, arena con grava, con poco o nada de finos			
		ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SP	Areñas mal graduadas, arena con grava, con poco o nada de finos			
		ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SM	Areñas limosas, mezclas de arena y limo			
	ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/8 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SC		Areñas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	
			ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SM		Areñas limosas, mezclas de arena y limo	
		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arcillosos o arcillosos ligeramente plásticos.		ML	G - Grava, S - Arena, O - Suelo Orgánico, P - Turba, M - Limo C - Arcilla, W - Bien Graduado, P - Mal Graduado, L - Baja Compresibilidad, H - Alta Compresibilidad
				Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas limosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		CL	
			Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	OL			
			Limos inorgánicos, limos melcosos o diatomáceos, más elásticos.	MH			
LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas finas.	CH				
		Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.	OH				
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	p				

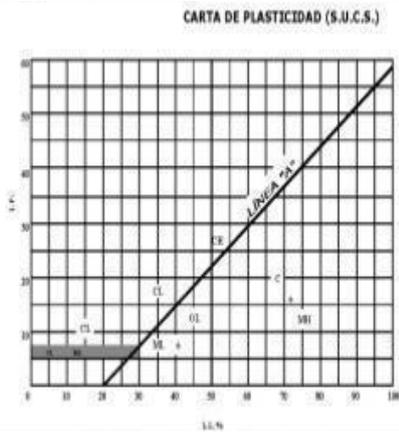


Figura 13. Cuadro de clasificación SUCS
Fuente: Crespo Villalaz (Mecánica de Suelos y Cimentaciones (1980))

Peso Unitario Seco In situ

El peso unitario seco in situ nos permite conocer la densidad seca natural de un suelo y se obtiene dividiendo la masa seca de la tierra entre el volumen del hoyo cuando se emplea el método del cono de arena (ASTM: D-1556) o se determina ensayando en una muestra inalterada cuya estructura o proporción de vacíos no haya sido alterada por el proceso de muestreo.

El peso unitario seco in situ es un buen parámetro para predecir el colapso, normalmente estos suelos tienen pesos unitarios bajos que indican una estructura de suelo suelta, es decir, presentan una gran proporción de vacíos. (Knodel, 1992)

Gravedad específica de los sólidos (Gs)

Es la relación, a una temperatura estable, de la masa (o peso en el aire) de un volumen unitario de material, a la masa del mismo volumen de agua a las temperaturas indicadas los valores son adimensionales (Norma Técnica Peruana 400.021, 2002).

El peso específico relativo de los sólidos o gravedad específica de un sólido se determina en el laboratorio haciendo uso de un matraz con marca de enrase. El matraz se llena hasta su marca, primero con agua y después con agua y la muestra de suelos. El aire atrapado entre las partículas de suelo se desaloja por ebullición o exponiendo la suspensión al vacío. Si la temperatura del agua es la misma que la de la suspensión puede obtenerse una fórmula para Gs (Badillo, 2005).

Contenido de humedad

“La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje, del peso de agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas sólidos” (Norma Técnica Peruana 339.127,2014). Los aparatos y procedimientos para la ejecución de este ensayo se explican con detalle en el método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas por masa, con el código ASTM D2216-92.

Normalmente estos suelos se encuentran en zonas áridas o semiáridas y tienen un contenido de humedad menor a la saturación. `Para el colapso se requiere un contenido de agua in situ muy inferior al 100% de saturación, siendo el rango del porcentaje óptimo de saturación para el colapso máximo entre 13% y 39% aproximadamente. (Knodel, 1992)

Máxima densidad seca

Según Huancas (2020) “la norma ASTM D-1557 establece que a los 56 golpes mediante el método C se obtiene la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad eliminando fuerzas de fricción y el acomodo de partículas generado por su propio peso”.

Dicha Norma fue adecuada a los suelos peruanos donde se realizaron ciertas modificaciones para el desarrollo de los ensayos proctor modificado. También se hace énfasis en las investigaciones realizadas a los suelos granulares de las cuales se resuelven que al producirse los 56 golpes no se

llega al punto de la máxima densidad ni el óptimo contenido de humedad, trazados en una curva de compactación dichos parámetros de estas investigaciones fueron evaluadas disponiendo la energía de compactación efectiva para una compactación mayor a los 56 golpes (Huancas, 2020).

Óptimo contenido de humedad

En la compactación del suelo se aplica la energía mecánica necesaria y se agrega un óptimo contenido de humedad a la masa del suelo para reducir el volumen de vacíos; aumentando así su densidad con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo.

Según Llique Mondragón y Guerrero Padilla (2014). “Cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco debido que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptima”.

Relación de soporte de California (CBR)

“Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base, subbase y de afirmado” (MTC E 132 – 2000). Se trabaja con especímenes que se obtienen a partir de ensayos que posean el mismo peso unitario y contenido de agua que se espera encontrar en el terreno para generar un procedimiento tal que los valores de la relación de soporte. En general, la condición más desfavorable se presenta cuando el material tiene una humedad crítica. Por esta razón, el método original de Ingenieros de E.U.A. recomienda y ejecuta los ensayos para las muestras después de estar hundidos en agua por tiempo de cuatro días envueltos en un molde con una carga igual a la masa del pavimento que actuará sobre el material (MTC E 132 – 2000).

Se podría precisar que la capacidad de soporte del suelo, CBR, es dependiente de una serie de parámetros directa e indirectamente, por ende, si se presenta un aumento del porcentaje de finos (<N200) de los suelos con llevaría a una reducción de la capacidad de soporte de este, la plasticidad elevada de suelos prioritariamente finos se observa una baja capacidad de soporte, y también a valores elevados de la máxima densidad seca se espera valores de CBR elevados (Huerta, 2005).

Según Montejo (2002) Las propiedades de los suelos que se deben tener en cuenta para la toma de decisiones del Proyectista encargado y reconocer mejor su comportamiento son:

Resistencia

La resistencia de los suelos se ve reducida cuando aumenta el contenido de humedad del estrato. Por otra parte, conforme a su humedad y energía de compactación, se encontrarán distintas características de resistencia para un suelo arcilloso, según Montejo (2002) “ya que un suelo de éstos compactado del lado seco en la curva de compactación presenta, con la humedad de compactación, un comportamiento relativamente elástico y con una resistencia relativamente alta” (p.77). Luego al trabajar este mismo suelo compactado con una alta humedad, no obstante que su peso volumétrico seco sea alto, “presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso: este efecto se debe, en general, a que una alta humedad produce en una arcilla efectos de repulsión entre sus partículas” (Montejo, 2002, p.77). Propiciando con ello que la cohesión sea menor que en el caso de emplear humedades de compactación bajas

Permeabilidad

Según Montejo (2002) relaciona los niveles de permeabilidad con la compactación de los suelos. En primer caso si se logra compactar un suelo arcilloso con niveles escasos de humedades o prácticamente seco, se tiene un resultado desfavorable con niveles altos de permeabilidad en el suelo “debido a los grumos que no se disgregan, resistiendo al esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales” (Montejo, 2002, p.77). En según lugar mientras se controlen niveles altos de humedad de compactación “se producirán menores permeabilidades en el suelo compactado, ya que éste tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos” (Montejo, 2002, p.77)

Compresibilidad

Los cambios en volumen o compresibilidad, tienen una importante influencia en las propiedades de los suelos, pues se modifica la permeabilidad, se alteran las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en sentido, lo que tiene una importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.

Durabilidad

Se involucran en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como una mala elección del agente estabilizador o un serio error en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos.

2.2.3 Suelos colapsables

Definición de suelos colapsables

Los suelos colapsables ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones nacionales e internacionales, en la presente investigación haremos referencia a las definiciones más relevantes.

Rodríguez , Salgado, Gallo, & Vanegas, (2013) definen los suelos colapsables como aquellos que experimentan un cambio de volumen debido a varios factores externos como la saturación del suelo, aumento de las cargas, carencia de agua, factores químicos, alto índice de porosidad y baja densidad. “Los suelos colapsables se definen como cualquier suelo no saturado que experimenta una reorganización radical de partículas y que disminuye enormemente su volumen al humedecerse, al recibir una carga adicional o ambos”. (Knodel, 1992, p. 1)

Rollins y Rogers (1994) definen que el fenómeno del colapso es repentino al variar su contenido de agua o por los cambios del volumen con o sin cargas externas. La variación del contenido de agua genera un aumento en la presión interna del suelo que conlleva a la reducción de la resistencia al corte, pero en estado seco y natural, los suelos colapsables poseen alta rigidez y resistencia al corte.

Según la Norma Técnica Peruana, E.050 Suelos y cimentaciones (2006) los define como “suelos que cambian violentamente de volumen por la acción

combinado individual de las siguientes acciones: a) al ser sometidos a un incremento de carga o b) al humedecerse o saturarse” (p.47).

Tipos de suelos colapsables

Quijano & Tenjo R. (2018) se distinguen principalmente cuatro tipos de suelos colapsables:

- Suelos aluviales y coluviales originados por la acción de las precipitaciones y gravedades.
- Suelos eólicos son depositados por acción del viento.
- Las cenizas volcánicas, como indica su nombre, son depositadas por volcanes activos o recientemente extintos.
- Los suelos residuales son depósitos producto de la meteorización química.

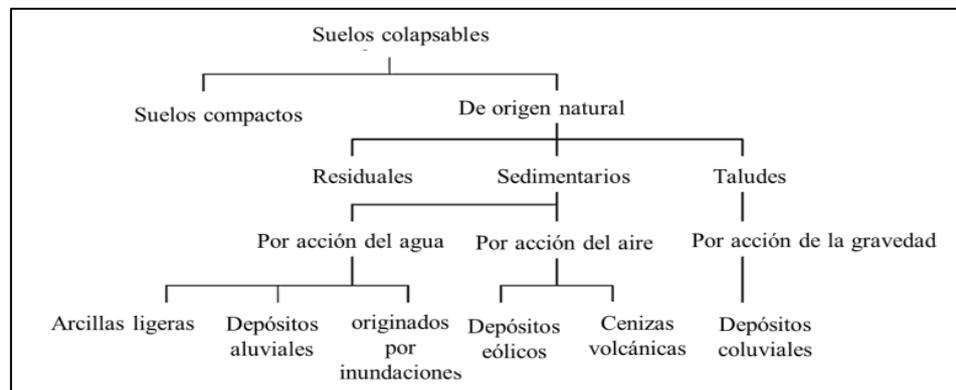


Figura 14. Familia de suelos colapsables
Fuente: Rogers (1992)

Uriel y Serrano (1974), citado por Redolfi (2007), clasifican en dos grupos a estos suelos, basado en el tipo de colapso que presentan:

Grupo I: A este grupo la causa del colapso es únicamente el cambio de las presiones efectivas. Pertenecen los limos, arcillas cementadas y las rocas de gran porosidad. Se presenta un rápido cambio de la relación entre presiones efectivas y las deformaciones sin que se alcance la resistencia última del material. Cuando se ensaya a humedad constante, se detecta una notable modificación de su módulo de compresibilidad al alcanzar un cierto valor las presiones efectivas (Uriel y Serrano, 1974).

Grupo II: En este tipo de Suelos no hay una variación repentina en la relación de presión-deformaciones. Presenta una curva suave y continua y sin inflexiones. No obstante, la saturación produce un significativo cambio

volumétrico, probablemente por un incremento de la presión de los poros que origina la disminución de la resistencia al corte del suelo (Uriel y Serrano, 1974).

Características de los suelos colapsables

Para Reginatto (1997), citado por Redolfi (2007) estos suelos presentan características comunes como:

- Estructura macroporosa, con relación de vacíos (e), entre relativamente alto a muy alto.
- Granulometría predominantemente fina, con predominio de fracción de limos y arcilla. Usualmente la cantidad de arcilla es escasa. Sin embargo, tiene una influencia importante en el comportamiento mecánico de la estructura intergranular
- Estructura mal acomodada, con partículas de mayor tamaño separadas por espacios abiertos, y unidas entre sí por acumulaciones o “puentes” de material predominantemente arcilloso. En muchos casos se presentan cristales de sales solubles insertados en tales puentes o uniones arcillosas.

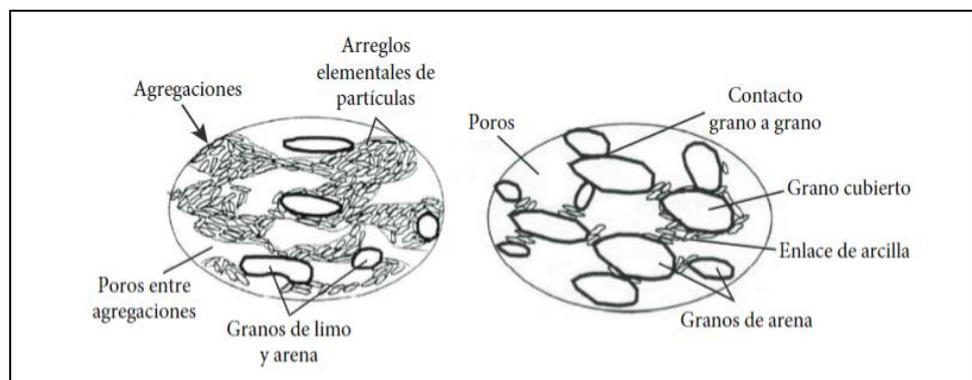


Figura 15. Estructura típica de los suelos colapsables.

Fuente: “Revisión teórica de evaluación del potencial de colapso en las dunitas de Medellín “, por Rodríguez, Salgado, Gallo, & Vanegas. (2013, p.2)

Según Rogers (1995) las características típicas de los suelos colapsables son:

- Estructura suelta
- Alto índice de vacíos
- Baja densidad seca
- Alta porosidad
- Proviene de depósitos relativamente jóvenes o recientemente alterados.

- Alta sensibilidad y baja fuerza de enlace entre las partículas.

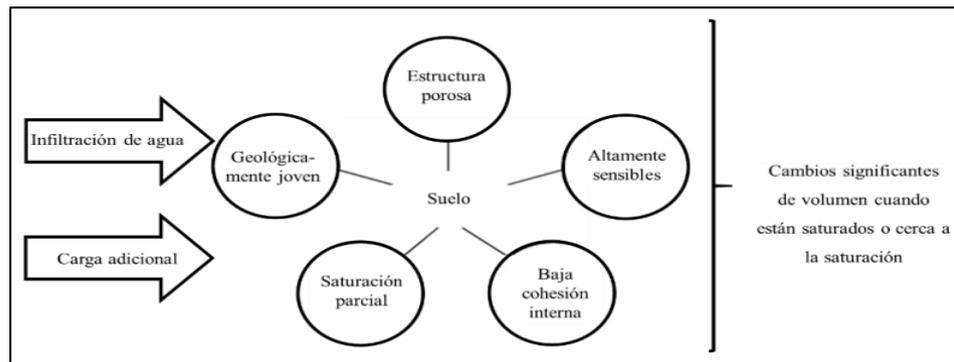


Figura 16. Esquema de las características clave de suelos colapsables
Fuente: Howayek et al. (2011)

El suelo colapsable presenta un comportamiento que es alterado por diferentes patrones entre estos tenemos el porcentaje de arcilla, los agentes cementantes, la relación de vacíos entre otros.

Los depósitos de suelo con mayor probabilidad de colapso son: los rellenos sueltos, arenas alteradas por el viento, abanicos aluviales de bajo peso unitario y granito descompuesto u otras rocas ígneas ácidas” (Knodel, 1992 , p.3)

Otras características de los suelos usados son el porcentaje de saturación, límite líquido, porosidad y gravedad específica En ocasiones no es necesario la aplicación de una sobrecarga al suelo para que se genere el colapso ya que el contenido de humedad se ubica por debajo del grado de saturación que es necesario para el colapso y el óptimo porcentaje de saturación para el colapso máximo está en el rango de 13 – 39%. (Knodel, 1992)

Observaciones en Campo

Una de las pruebas de campo que se realiza para identificar este tipo de suelos es la llamada “Prueba salchicha” (Clemence & Finbarr 1981, citado por Quijano et al. 2018), el primer paso es la extracción de un bloque in situ de suelo de aproximadamente 500 cm³, de un pozo de prueba. En el cual se moldean dos partes que sean casi iguales en volumen, la primera se humedece y se moldea hasta formar una bola húmeda, finalmente al comparar las dos muestras, si la muestra humedecida es más pequeña, entonces es un indicio de que se tienen suelos colapsables.

Criterios para la identificación de suelos colapsables

Según la norma E-050 los parámetros físicos del suelo como su densidad natural seca y límite líquido nos permiten determinar si un suelo es colapsable. Este criterio es el más utilizado a nivel nacional por diferentes Geotecnistas por su fácil aplicación. Sin embargo, será de importancia realizar ensayos de laboratorio que nos permitan determinar el índice o el potencial del colapso.

Para Bureau of Reclamation (1980), Gibs y Bara (1962), citado por Knodel (1992) este criterio establece que los vacíos de una masa de suelo deben de tener la capacidad suficiente para contener el agua que propicie que el suelo este en su límite líquido.

Según la figura 17 los valores de la densidad natural seca situados por encima de la línea se encuentran en condición suelta y cuando estén completamente saturados tendrán un contenido de agua mayor que el límite líquido.

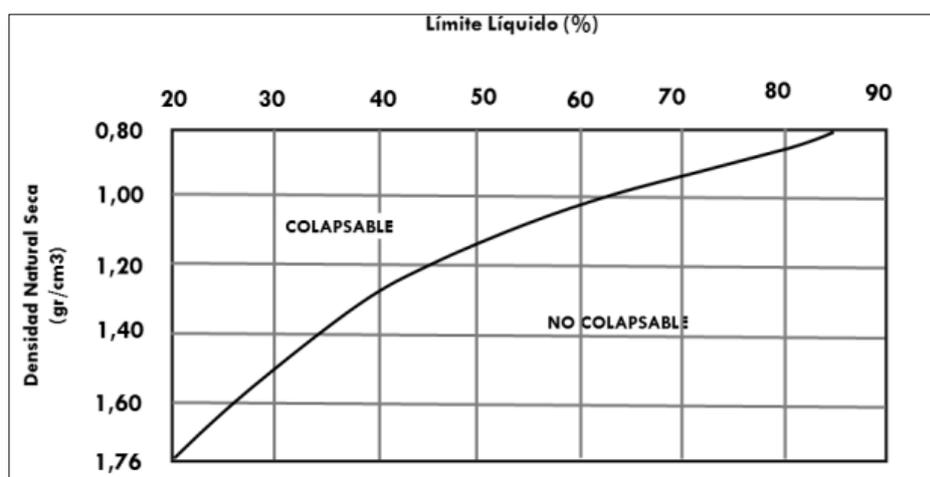


Figura 17. Criterios del Potencial de Colapso
Fuente: E.050 Suelos y Cimentaciones.

Cuando el suelo tiene una densidad seca natural baja tienen mayor proporción de vacíos grandes como para mantener el contenido de agua del límite líquido o más; por lo tanto, la saturación puede alcanzar fácilmente una consistencia del límite líquido en la que el suelo ofrece poca resistencia a la deformación. Si los espacios vacíos son mayores que esa cantidad, la saturación resultaría en un contenido de agua mayor que el del límite líquido y el potencial de colapso sería alto. Este criterio no considera los efectos temporales de la cementación; sin embargo, es útil porque todos los suelos colapsables se

debilitan por la humectación ya sea se forma inmediata o lenta. (Knodel, 1992)

Es necesario analizar diferentes metodologías y criterios propuestos por diversos autores para identificar un suelo colapsable, hay una variedad de criterios, los cuales se determinan en base a la relación de vacíos, densidad natural seca, grado de saturación, límites de Atterberg, humedad natural y porcentaje de suelo fino. A continuación, se presenta un resumen de estos criterios: (Das, 1999)

Investigador	Año	Criterios
Denisov	1951	<p>Coefficiente de hundimiento</p> $K = \frac{\text{relación de vacíos en el límite líquido}}{\text{relación de vacíos natural}}$ <p> $K = 0.5-0.75$: altamente colapsable $K = 1.0$: no colapsable $K = 1.5-2$: Suelos no colapsables </p>
Clevenger	1958	<p>Si el peso específico seco es menor que 12.6 KN/m³, el asentamiento será grande; Si el peso específico seco es mayor que 14 KN/m³ el asentamiento será pequeño</p>
Prirkonski	1952	$K_D = \frac{\text{contenido de humedad natural} - \text{límite plástico}}{\text{índice de plasticidad}}$ <p> $K_D < 0$: suelos altamente colapsables $K_D > 0.5$: suelos no colapsables $K_D > 1$: suelos expansivos </p>
Gibbs	1961	<p>Relación de colapso $R = \frac{\text{Contenido natural de humedad}}{\text{Límite líquido}}$ Esto se puso en forma gráfica</p>
Soviet Building Code	1962	$L = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0}$ <p>donde e_0 = relación de vacíos natural y e_L = relación de vacíos en el límite líquido. Para el grado de saturación natural menor que 60 %, si $L > -0.1$, el suelo es un suelo colapsable.</p>
Feda	1964	$K_L = \frac{W_0}{S_r} - \frac{LP}{IP}$ <p>donde W_0 = contenido de humedad natural, S_r = grado de saturación natural, LP= límite plástico e IP= índice de plasticidad. Para $S_r < 100$ %, si $K_L > 0.85$, el suelo es un suelo colapsable.</p>
Benites	1968	<p>Una prueba de dispersión en la que 2 g de suelo se dejan caer en 12 ml de agua destilada y la muestra se cronometra hasta que se dispersa; los tiempos de dispersión de 20 a 30 s se obtuvieron para los suelos colapsables en Arizona.</p>
Handy	1973	<p>Loess de Iowa con contenido de arcilla (< 0.002 mm):</p> <ul style="list-style-type: none"> < 16 %: alta probabilidad de colapso 16-24 % : probabilidad de colapso 24-32 % : menos de 50% de probabilidad de colapso > 32%: suele ser seguro contra el colapso

Figura 18. Criterios para la identificación de suelos colapsables
Fuente: (Das 2007; Luttenegger (1998)

Método de ensayo de colapso

El método de ensayo consiste en colocar una muestra de suelo con su contenido natural de humedad en el consolidómetro, aplicando un esfuerzo

vertical predeterminado a la muestra y saturándolo, para inducir el potencial de colapso en la muestra de suelo. El fluido debe ser agua destilada cuando se evalúe el índice de colapso, I_c . El fluido puede simular la presión de poros de la muestra u otra condición de campo si fuera necesario, al evaluar el potencial de colapso, I_c (Instituto Nacional de Vías, E - 157).

El método de Jennings, J. y Knight, K. (1975), fueron uno de los pioneros en realizar investigaciones sobre suelos colapsables, ellos recomendaron un procedimiento para determinar el potencial de colapso de un suelo, el cual consiste en obtener una muestra de suelo inalterado con su contenido de humedad natural en un anillo de consolidación, muestra de aproximadamente 5 cm. de diámetro y 2 cm. de altura, aplicar cargas escalonadas hasta la presión de 2 kg/cm², luego se inunda la muestra de suelo hasta saturarla y se deja reposar. Determinándose las relaciones de vacíos antes y después de la saturación, e_1 y e_2 , calculando con ello el potencial de colapso C_p , respecto a la relación de vacíos inicial e_0 (Flores, 2018).

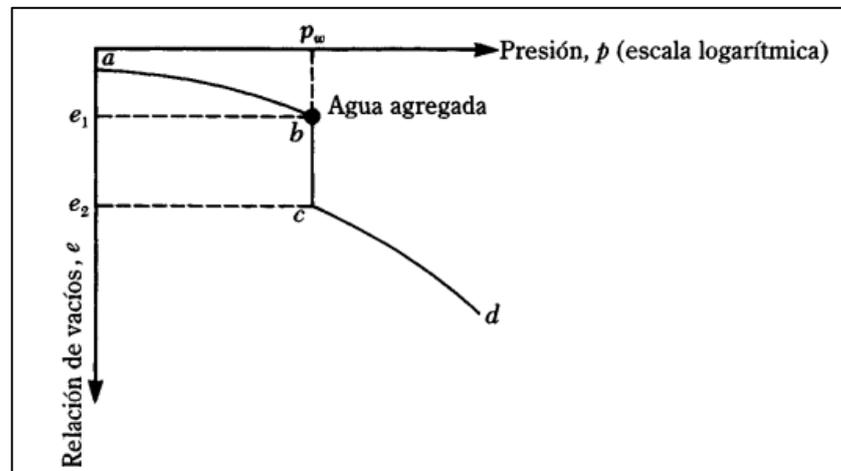


Figura 19. Ensayo de normalizado del potencial de colapso.
Fuente: “Principios de ingeniería de cimentaciones”, por Das. (1999, p.729)

Cálculo de índice del potencial de colapso

El índice de colapso (I_c) se utiliza para medir un índice básico de las propiedades del suelo. La ecuación se puede escribir en términos de relación de vacíos:

$$I_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \times 100$$

Donde:

Δe = Cambio en la relación de vacíos resultante del humedecimiento

e_0 = Relación de vacíos inicial

como el ensayo se realiza en condiciones unidimensionales, I_c también se puede expresar de la siguiente manera:

$$I_c = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100$$

Donde:

Δh = Cambio en la altura de la muestra, debido al humedecimiento mm (pulgadas)

h_0 = Altura inicial de la muestra, mm (pulgadas).

Con la determinación del índice de colapso los datos se grafican en función de la relación de vacíos vs logaritmo de esfuerzo vertical.

Clasificación del índice de colapso

El índice de colapso (I_e), se utiliza para describir el grado de colapso de un suelo. Como se observa en la siguiente tabla:

Tabla N° 1

Medición cuantitativa de índice de colapso (%)

Grado de Colapso	Índice de Colapso
Ninguno	0
Leve	0.1 a 2.0
Moderado	2.1 a 6.0
Moderadamente severo	6.1 a 10.0
Severo	> 10.0

Fuente: Instituto Nacional de Vías, E - 157

Ensayos de laboratorio Thomton y Arulanandan (1975) y Nowatzki (1985) citados por knodel (1992) se evidencian que los suelos colapsables muestran niveles bajos de pesos unitarios en consecuencia la densidad natural seca se convierte en un parámetro adecuado para hallar el potencial de colapso. Así también existe una adaptación para hallar el potencial de colapso con la densidad natural seca y el límite líquido.

El potencial de colapso puede ser evaluado en base al cambio en la altura de la muestra (volumen), cuando se humedece, Jennigs y Knight (1975), citado por knodel (1992), han sugerido algunos valores para el potencial de colapso, los cuales son mostrados a continuación:

Cambio de volumen (%)	Severidad del problema
0-1	Sin problema
1-5	Problema moderado
5-10	Problema
10-20	Problema severo
>20	Problema muy severo

Figura 20. Criterios de Colapsabilidad
Fuente: Jennigs y Knight (1975)

Estructura del pavimento

Suelo de fundación

“En ingeniería, la mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la física y las ciencias naturales a los problemas que involucran las cargas impuestas a la capa superficial de la corteza terrestre” según Lozada, H. & Santos, E. (2021). En su gran mayoría los proyectos de ingeniería civil son construidos sobre el suelo de fundación, además, hacen uso de la tierra y rocas como componente de construcción para diques y terraplenes en general; por ende, se deben realizar estudios en base a su estabilidad, comportamiento y funcionalidad, entre otros factores, para conocer el desempeño del material in situ dentro del interior de influencia de los esfuerzos que se generan. Se debe considerar en el diseño los límites de la capacidad resistente del suelo, ya que si se sobrepasan o aun sin llegar a ellos se pueden producir deformaciones considerables y producir esfuerzos secundarios en la estructura como fisuras,

grietas, alabeo o desplomes que se pueden producir en los pavimentos (Lozada, H. & Santos, E. 2021).

Subrasante

“La subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado”. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).

La calidad de la subrasante es importante ya que de esta depende el espesor que debe requerir un pavimento ya sea flexible o rígido. Para la evaluación de esta capa se tendrá en cuenta el parámetro de la capacidad de soporte o resistencia a la deformación por esfuerzos cortantes bajo las cargas de tránsito. (Lozada, H. & Santos, E. 2021).

Para conocer si la subrasante presenta una buena capacidad de soporte se debe tener en cuenta la siguiente relación; cuando los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una zanja no menor de 60 cm, presenta un CBR $\geq 6\%$ entonces los suelos son estables y adecuados.

En caso contrario el suelo debajo del nivel superior de la subrasante tenga un CBR $< 6\%$ (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar el suelo según criterios del ingeniero responsable para una posible solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilizaciones físicas como el uso de geosintéticos, una estabilización química de los suelos, cambiar el trazo vial, optando por la solución más favorable técnica y económica. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013).

El trabajo que realiza la subrasante es recibir las fuerzas transmitidas por el tránsito vehicular y estas son repartidas hacia el terreno natural, es decir, la cimentación de los pavimentos. La capa de subrasante es importante ya que según su calidad puede economizar los espesores del pavimento. También una función para resaltar es la impermeabilización que evita que los materiales finos plásticos del cuerpo del terreno natural contaminen al pavimento y que sea absorbido por las terracerías. (Álvaro, C. 2021).

Tabla N°2

Categorías de subrasante

Categorías de Subrasante	CBR
S0: subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: subrasante Pobre	De CBR \geq 3% a CBR < 6%
S2: subrasante Regular	De CBR \geq 6% a CBR < 10%
S3: subrasante Buena	De CBR \geq 10% a CBR < 20%
S4: subrasante Muy Buena	De CBR \geq 20% a CBR < 30%
S5: subrasante Excelente	De CBR \geq 30%

Fuente: “Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos “, por MTC. (2014, p.37)

Base

Funciones de la capa base del pavimento según Alonso Montejó (2002) en su libro Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, son:

- Servir como capa de transición y suministrar un apoyo uniforme, estable y permanente del pavimento.
- Facilitar los trabajos de pavimentación.
- Mejorar el drenaje y reducir por tanto al mínimo la acumulación de agua bajo el pavimento.
- Ayudar a controlar los cambios volumétricos de la subrasante y disminuir al mínimo la acción superficial de tales cambios volumétricos sobre el pavimento.
- Mejorar en parte la capacidad de soporte del suelo de la subrasante

Sub base

El material granular para la capa de subbase deberá cumplir los requisitos mínimos establecidos en la Sección 402 del Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, vigente. Asimismo, se deben cumplir los requisitos de equipos, requerimientos de construcción, control de calidad, aceptación de los trabajos y las consideraciones de $CBR > 40$ referido al 100% de la Máxima Densidad Seca y una Penetración de 0.1" (2.5mm). (MTC, 2014)

Superficie de rodadura

Según Alonso Montejo (2002) en su libro Ingeniería de Pavimentos para Carreteras, "Las funciones de la losa en el pavimento rígido son las mismas de la carpeta en el flexible, más la función estructural de soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen" (p.7).

La superficie de rodadura puede ser una carpeta asfáltica o una losa de concreto dependerá si es un pavimento rígido, semirrígido o flexible.

Los pavimentos de concreto reciben el apelativo de "rígidos" debido a la naturaleza de la losa de concreto que la constituye. Debido a su naturaleza rígida, la losa absorbe casi la totalidad de los esfuerzos producidos por las repeticiones de las cargas de tránsito, proyectando en menor intensidad los esfuerzos a las capas inferiores y finalmente a la sub rasante (MTC, 2014).

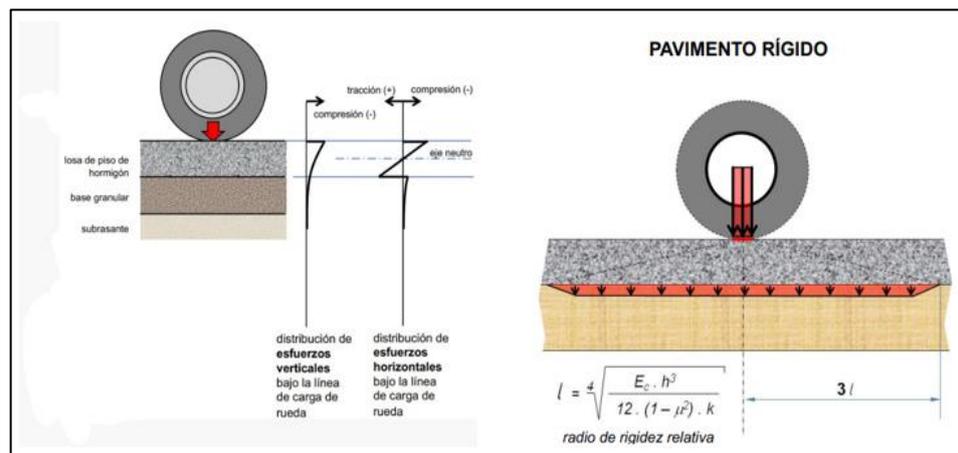


Figura 21. Distribución de esfuerzos de un piso industrial

Fuente: "Seminario sobre Pisos Industriales de Hormigón", por E. Becker. (2018, p.8)

Como se observa en la figura 21 las losas del pavimento rígido absorben la mayor cantidad de esfuerzos transmitidos por las cargas vehiculares siendo estas tensiones mínimas distribuidas homogéneamente hacia la subbase. Las distribuciones de tensiones se producen en una zona de área muy importante de acuerdo al radio de rigidez relativa (radio de interacción de una carga puntual).

En la zona de estudio se evidencia la presencia de una gran cantidad de fábricas conformadas por plantas y almacenes, que están constituidos por pisos industriales. “Se conoce como pisos industriales a todas aquellas superficies, generalmente apoyadas sobre el terreno, capaces de soportar situaciones de carga y/o desgaste de gran magnitud” (Becker, 2018). El suelo de fundación debe tener uniformidad de comportamiento, es decir no puede presentar material variable como zonas con suelos blandos y suelos rígidos a la vez. Se debe realizar ensayos en campo para verificar que se cumpla una rigidez mínima en diferentes áreas de la base de apoyo.

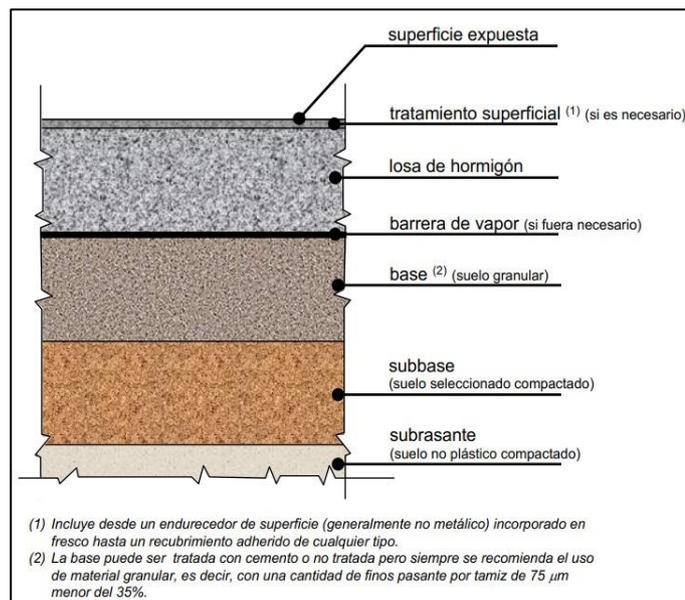


Figura 22. Paquete estructural típico de un piso industrial de hormigón.
 Fuente: “Seminario sobre Pisos Industriales de Hormigón”, por E. Becker. (2018, p.11)

Se aprecia un corte típico de un piso industrial donde vemos una losa de concreto no menor de 15cm de espesor dependiendo de las cargas que va soportar el pavimento estos espesores pueden llegar a 35cm; por ejemplo, para grandes áreas industriales de almacenamiento. El paquete estructural se diseñará en función de las cargas que pasen por encima y las características del suelo de fundación. En pisos industriales donde se generan condiciones

de desgaste considerables se suelen tener un tratamiento superficial que mejore esta condición de debilidad natural originada por la exudación o altas concentraciones de agua en la superficie. En estos casos se emplea un endurecedor en polvo para mejorar la resistencia superficial.

Cargas aplicables a un piso industrial

Las cargas comunes en los pisos de las bodegas de almacenamiento son las cargas puntuales de la estantería, las cargas asociadas a los equipos de manejo de materiales (MHE) y los entrepisos. Otras cargas surgen de cargas uniformemente distribuidas (UDL) como el apilamiento de productos estibados o materiales sueltos a granel y de cargas de línea tales como paredes internas y sistemas de rieles de piso.

Tipos de carga

El diseño de un pavimento industrial debe basarse en las cargas que puedan ser aplicadas por todo tipo de equipos, cargas puntuales, cargas uniformemente distribuidas y demás cargas que el diseñador tenga en cuenta según los usos futuros del piso.

Las cargas puntuales provenientes de la estantería de estibados y los entrepisos se tratan como cargas estáticas, mientras que MHE (cargas asociadas a los equipos de manejo de materiales) se trata como una carga dinámica que atrae mayores factores de seguridad en el diseño.

El diseño del piso también debe tener en cuenta las cargas temporales de grúas u otros equipos de manejo de materiales utilizados durante la instalación, el mantenimiento y la eliminación de equipos de fabricación o almacenamiento.



Figura 23. Cargas temporales de tráileres de transporte frigorífico

Fuente: Elaboración Propia

Tales cargas temporales pueden ser mayores que las cargas permanentes por lo que hay que ser previsivos de que equipos temporales van a hacer uso del pavimento industrial en todas sus etapas. Para la presente tesis se estima que habrá cargas temporales de tráileres de transporte frigorífico cargados con productos marinos. (Ver figura 23)

Equipos de bodega cargas estáticas. En muchas bodegas o zonas industriales es utilizada estantería para el almacenamiento de productos o materiales, las cargas que soportan las estanterías son transmitidas por los postes de la estantería al piso induciendo esfuerzos importantes. Este tipo de cargas genera unos esfuerzos de flexión que pueden ser más grandes que los esfuerzos causados por las cargas de las llantas de los equipos de manipulación de mercancías, por lo que las cargas de los postes de las estanterías pueden ser el factor más determinante en el diseño del espesor de la losa del pavimento.

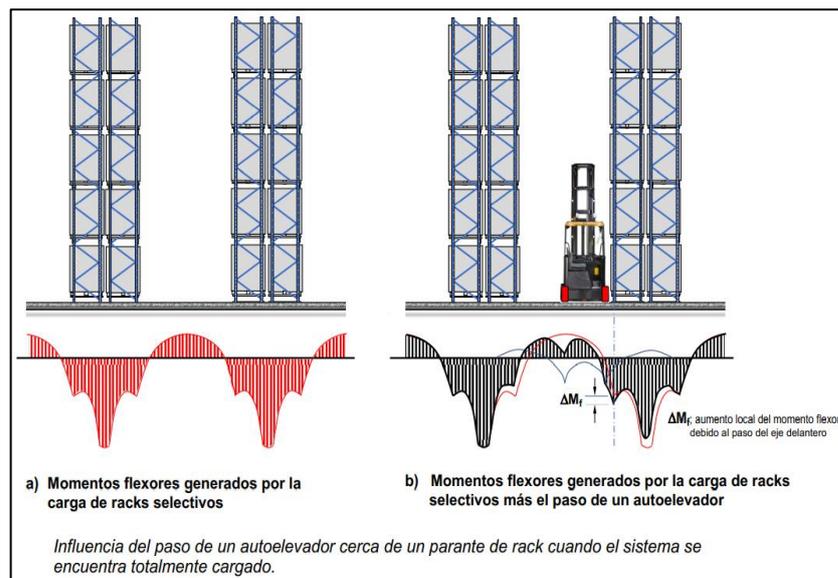


Figura 24. Cargas estáticas o “muertas” y estados combinados de carga
Fuente: “Seminario sobre Pisos Industriales de Hormigón”, por E. Becker. (2018, p.18)

Según la figura 24 se puede visualizar en la parte izquierda los momentos flexores generados por los racks selectivos (Carga estática o muerta) y al lado derecho los esfuerzos generados por las cargas de racks en conjunto con el paso de un auto elevador (Carga viva). Cuando un auto elevador pasa por el pasillo, el peso de sus neumáticos junto con el de la rueda del rack genera un incremento del momento flector.

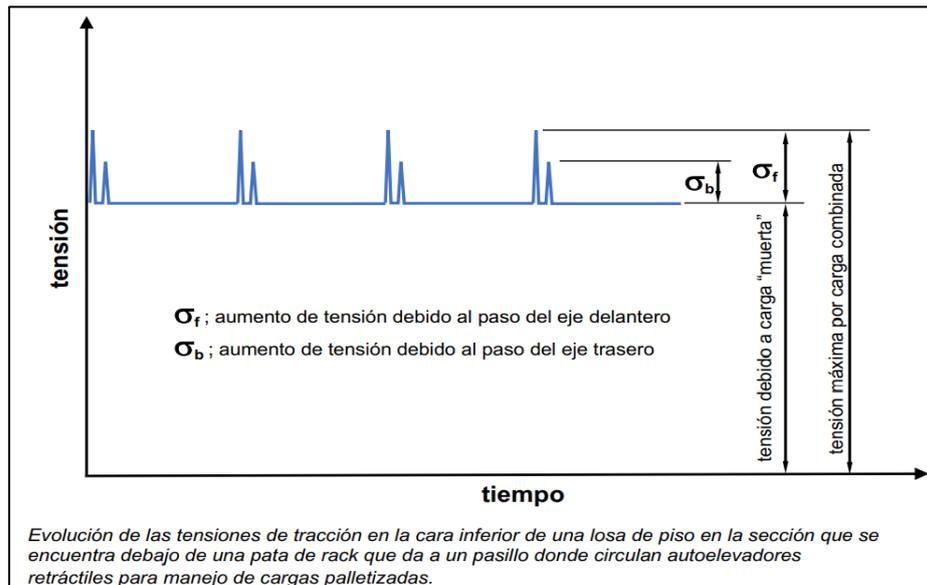


Figura 25. Tensión vs tiempo para esfuerzos de tracción en el pavimento
Fuente: “Seminario sobre Pisos Industriales de Hormigón”, por E. Becker. (2018, p.19)

En la figura 25 podemos visualizar la evolución de tensiones de una losa de un pavimento industrial. Inicialmente la losa presenta tensiones de tracción producidas por la carga “muerta”, a medida que circulen equipos descargados o con carga de material estas tensiones van aumentar. La concentración de la carga de estos equipos puede ser en los ejes delanteros o traseros, esto dependerá principalmente de cuanta carga de material transporte. Por ejemplo, si traslada su máxima capacidad, la mayor concentración de carga será en los ejes delanteros y si se encuentra descargado, ya sea estático o en movimiento, será en los ejes traseros. Por lo tanto, en los ejes delanteros se genera una mayor tensión de tracción en la losa de pavimento industrial.

Equipos de bodega – cargas dinámicas (Lb/pulg³). Para el diseño de pisos industriales que soporten las cargas impuestas por los equipos de manipulación de materiales, se debe conocer la composición de cada uno de los equipos dispuestos para el movimiento de las cargas dentro de la bodega o zona industrial. La capacidad de carga del equipo no es un indicador adecuado de las cargas que soporta el pavimento, la distribución de la carga y los pesos del eje puede variar significativamente entre la condición cargada y descargada, siempre que sea posible se deben usar los datos del fabricante del montacargas.

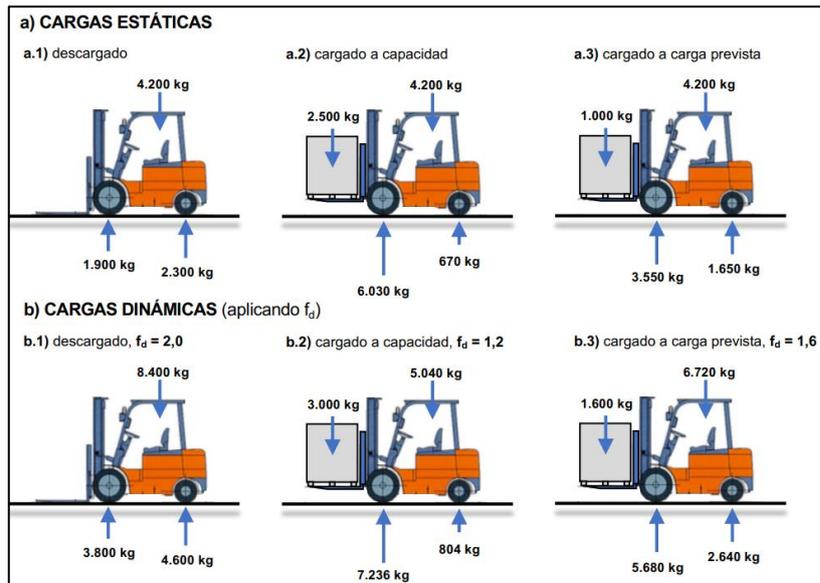


Figura 26. Cargas dinámicas o vivas
 Fuente: “Seminario sobre Pisos Industriales de Hormigón”, por E. Becker. (2018, p.16)

Como se mencionó anteriormente se debe conocer la composición de cada equipo y además analizar el comportamiento de las cargas que transmiten sus ejes delanteros y traseros en condiciones estáticas y dinámicas. Un equipo muy utilizado en almacenes industriales es el auto elevador de carga, como se ilustra en la Figura 26, las cargas estáticas y dinámicas varían según la carga de material que se traslade. Si el equipo se encuentra descargado los ejes traseros transmiten mayor carga a la losa; en cambio cuando el equipo traslada una carga prevista o está cargado a capacidad, las cargas de los ejes delanteros son mayores. En condiciones de operatividad se considera un factor dinámico (f_d), que es una mayoración de las cargas por un factor dinámico, el cual varía dependiendo de la velocidad de operación prevista para el equipo.

Existe un gran número de equipos de manipulación de cargas, los cuales dependiendo del uso de zona industrial pueden cambiar, sin embargo, la PCA determina que los equipos representativos para el diseño son aquellos que tienen ejes duales y sencillos en la parte frontal o de carga del equipo.

La configuración anteriormente expuesta se encuentra en un gran número de equipos, a continuación, se enuncian los equipos más comunes encontrados en bodegas industriales.

- Montacargas con contrapeso.
- Montacargas de alcance.
- Montacargas frontales y laterales.
- Montacargas de contrapeso articulados.
- Grúas apiladoras.

Cuando se inicia un proyecto de diseño de una losa de concreto por cargas dinámicas, el procedimiento involucra la determinación de los siguientes componentes específicos para el diseño.

- Carga de eje máxima.
- Número de repeticiones de carga.
- Área de contacto de la llanta.
- Espaciamiento de ruedas del eje más pesado.
- Resistencia de la subrasante.
- Resistencia de flexión del concreto MR.
- Factor de seguridad.
- Transferencia de carga en las juntas.

Como se enuncio con anterioridad se tiene una gran variedad de tamaños, cargas por ejes y espaciamientos de las llantas de los montacargas, por este motivo la PCA no considero practico proveer cartas de diseño para cada vehículo en específico por lo tanto solo dispuso de dos características principales que es la configuración del eje de carga del equipo, sencillos y duales.

2.3. Definición de términos básicos

- Suelos colapsables: Son suelos que experimentan un cambio de volumen debido a varios factores externos como la saturación del suelo, aumento de las cargas, carencia de agua, factores químicos, alto índice de porosidad y baja densidad.
- Dosificación: Proceso de medición por peso o volumen de los ingredientes que conforman la mezcla.
- Estabilización: proceso físico o químico, mediante el cual se mejora las propiedades mecánicas de un suelo.
- Límite líquido (L.L.): Contenido de agua entre el estado plástico y líquido de un suelo.

- Límite plástico (L.P.): Contenido de agua entre el estado plástico y el semisólido.
- Suelos estabilizados: son suelos pobres o inadecuados de baja estabilidad a los cuales es necesario adicionarles un estabilizador.
- California bearing ratio (CBR): Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base, subbase y de afirmado.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Determinando el tipo de estabilizador se mejora las propiedades físicas-mecánicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) Determinando las propiedades físicas de los suelos colapsables se seleccionan los tipos de estabilizadores en pavimentos industriales en la zona de Paita, Piura.
- b) Los estabilizadores seleccionados mejoran las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita.
- c) El 8% de cemento como estabilizador incide favorablemente en las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita.

3.2. Variables

3.2.1 Definición conceptual de las variables

- Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto, genéricamente denominado estabilizador, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto (MTC, 2005, p.4).

- Suelos Colapsables

Los suelos colapsables, que en ocasiones se denominan suelos metaestables, son suelos no saturados que experimentan un gran cambio de volumen al saturarse. El cambio puede o no ser el resultado de la aplicación de una carga adicional. (Braja M. Das, 1983, p.686).

3.2.2 Operacionalización de las variables

- Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es un procedimiento muy usado en proyectos de carreteras que consiste en el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de

productos químicos, naturales o sintéticos. (MTC, Manual de Carreteras, Sección: Suelos y Pavimentos. Lima-Perú, abril 2014. Pág. 92.)

- Suelos Colapsables

En los lugares donde se conozca o sea evidente la ocurrencia de hundimientos debido a la existencia de suelos colapsables, el PR deberá incluir en su EMS un análisis basado en la determinación de la plasticidad del suelo NTP 339.129 (ASTM D4318), del ensayo para determinar el peso volumétrico NTP 339.139 (BS 1377), y del ensayo de humedad NTP 339.127 (ASTM D2216), con la finalidad de evaluar el potencial de colapso del suelo en función del Límite Líquido (LL) y del peso volumétrico seco (γ_d). (Norma E050, Pag.42)

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y nivel

4.1.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptiva, porque se realizó una descripción de la información obtenida a base de los ensayos de laboratorio, a fin de mejorar las propiedades físicas mecánicas de los suelos colapsables para seleccionar los estabilizadores en pavimentos industriales en la zona de Paita, Piura.

4.1.2 Método de la investigación

El método de estudio es deductivo, ya que mediante la información de ensayos de laboratorio se analizarán los resultados obtenidos para los tipos de estabilizadores, llegando a determinar su aplicabilidad en beneficio de los suelos colapsables.

- Orientación de la investigación

La orientación de nuestra investigación es aplicada, porque del análisis de la información de ensayos de laboratorio se determinará su aplicación para los tipos de estabilizadores.

- Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, porque se utiliza la recolección de datos para medir las variables a través de ensayos de laboratorio.

- Fuente de la investigación

En esta investigación la fuente de información es prolectiva, ya que recopilaremos información de fuentes primarias existentes como tesis, libros y/o artículos con fines similares al estudio.

- Nivel de la investigación

La presente investigación es descriptiva, ya que está orientada a describir los tipos de estabilizadores para el mejoramiento de las propiedades físicas mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita, Piura.

Asimismo, también es una investigación explicativa, porque se describen los resultados obtenidos producto del mejoramiento con estabilizadores.

4.2 Diseño de investigación

El diseño de la investigación es experimental, longitudinal y prospectivo, porque se está determinando el tipo de estabilizador que mejora las propiedades mecánicas físicas de un suelo colapsable en pavimentos industriales.

4.3 Población y muestra

La población de la investigación son los suelos colapsables ubicados en la zona industrial de Paita Alta, de la provincia de Paita – Piura.

El muestreo es no probabilístico debido a que se toman de acuerdo con lo especificado en la normativa E.050 Suelos y cimentaciones, con el objetivo de obtener resultados de laboratorio respecto a las propiedades físicas mecánicas de la subrasante del pavimento estabilizado con cemento y cal.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos

La presente investigación es un estudio prolectivo y documental debido a que se recolectan datos de fuentes primarias como: papers, libros, trabajos de grado, artículos de revistas y folletos; que recabaron previo al inicio de la investigación.

A su vez, Riskey y Col. (2002), opinan que la investigación documental “tiene como propósito la revisión de fuentes documentales recolectando, evaluando, verificando y sintetizando evidencias de lo que se investiga, con el fin de establecer conclusiones relacionadas con los objetivos de investigación” (p.40).

4.4.2 Criterios de validez y confiabilidad de los instrumentos

La presente investigación se basa en tesis nacionales e internacionales y artículos científicos (Papers). Además de la recolección de información del centro peruano japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres y normativas nacionales e internacionales.

4.4.3 Procedimientos para la recolección de datos

Una vez obtenida y recopilada la información nos abocamos de inmediato a su procesamiento, esto implica realizar un análisis según los resultados de laboratorio, empleando los diferentes estabilizadores. Finalmente se recomienda el tipo de estabilizador que mejora las propiedades físicas mecánicas de un suelo colapsable en pavimentos industriales.

4.5 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

Las técnicas de procesamiento y análisis de datos de la investigación están basadas en recopilar, clasificar y analizar la información, determinando el tipo de estabilizador que mejora las propiedades físicas – mecánicas de un suelo colapsable en pavimentos industriales.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Caracterización de las Propiedades de los Suelos del área de estudio.

En el presente Capitulo se estudia informes previos de zonificación geotécnica del área de estudio, se realizan exploraciones en campo y ensayos de laboratorio para la caracterización del área de estudio Paita Alta – Piura. Asimismo, se describe los aspectos geológicos, climatológicos, geodinámicos debido a que la clasificación de los suelos también se encuentra condicionados por las características litológicas de las rocas pre existentes y la dinámica que presentan dichos sucesos.

5.1.1 Aspecto Geológico

“En la localidad de Paita se han identificado 06 unidades geomorfológicas que corresponden a colina, loma, tablazo, terraza marina, playa y acantilado.” (Bernal & Gómez, 2019, p.17) El área de estudio se asienta en el tablazo comúnmente denominado como Paita Alta en donde se desarrollan las nuevas poblaciones e industrias pesqueras. (Ver figura 27).

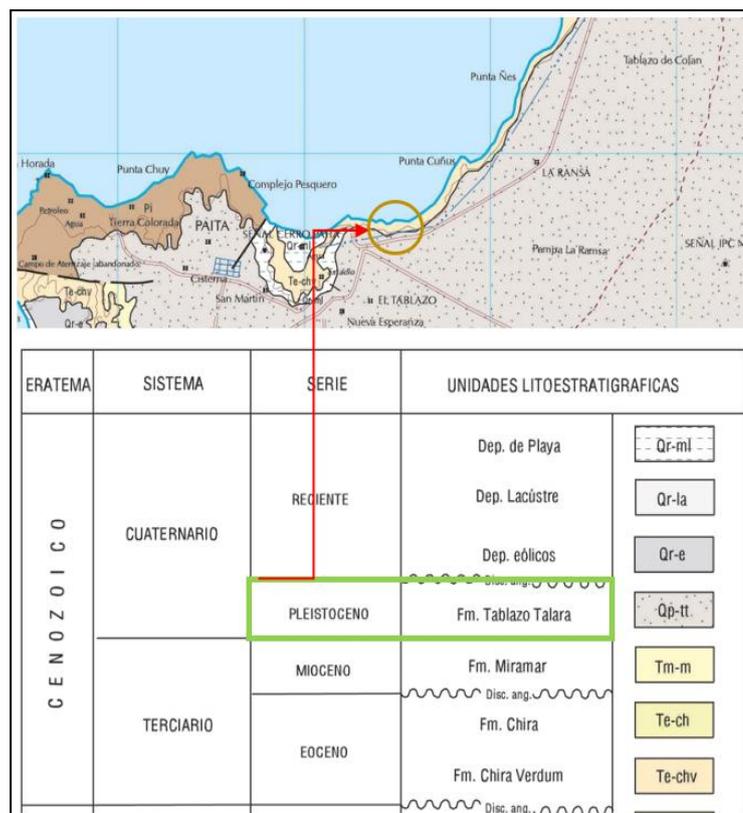


Figura 27. Carta Geológica Nacional Paita 1:100,000
Fuente: INGEMMET, 1998

La provincia de Paita se establece sobre un sustrato rocoso constituido por pizarras esquistosas muy meteorizadas, y encima de estas se localizan rocas sedimentarias de tipo areniscas calcáreas, lutitas y margas con incrustación

de coquinas y conchuelas, las cuales están muy fracturadas y de fácil erosión lo que genera inestabilidad en los taludes del tablazo de Talara. El área de estudio ubicada en la zona de Paita alta está conformada por materiales no consolidados originados por procesos de erosión, se ha reconocido unidades litológicas aflorantes el suelo representativo como es la parte superior del tablazo se evidencia la presencia de areniscas gravosas con diámetros que llegan hasta 40cm de forma angulosa (Ortiz, Carrillo, & Gómez, 2021).

5.1.2 Aspecto Climatológico-Geodinámico

Se ha reconocido eventos geodinámicos que alteran a la población de Paita como son las inundaciones fluviales que afectan el sector de Paita baja por el desborde de la quebrada el Zanjón en temporadas de evento Niño y las inundaciones pluviales que afectan el sector de Paita alta debido a las precipitaciones extremas producto de los eventos del Niño, las depresiones mínimas denominadas cuencas ciegas, en el 2017 Paita se vio afectada con la ocurrencia de los eventos mencionados anteriormente producto de las ocurrencia del evento Niño (Bernal & Gómez, 2019).

Según la información registrada en la estación “La Esperanza” durante el periodo 2012-2018, la ciudad presenta un clima cálido en los meses de verano desde diciembre-mayo con una temperatura máxima de 34.5 °C y en invierno durante el periodo Junio-octubre, temperatura mínima de 14.8 °C. Durante los eventos Niño la temperatura puede aumentar de 2 °C a 4°C. Las precipitaciones en la ciudad de Paita, en promedio se hallan entre 1 mm a 38 mm (acumulada mensual) en condiciones climáticas normales durante el periodo 2012-2018. Según el Centro de Operaciones de Emergencia del Gobierno Regional, en los Eventos Niño se han registrado precipitaciones de 910,8 mm (Niño 1983) y lluvias diarias máximas entre 70 a 100 mm (Niño, 1997-1998). Por otro lado, en el Evento Niño del año 2017, se registró una acumulación mensual de precipitaciones de 198.40 mm, teniendo como precipitación máxima diaria de 65.9 mm. (Bernal & Gómez, 2019)

5.1.3 Aspectos Geotécnicos

Con la finalidad de estudiar y determinar las propiedades físicas del suelo de la zona industrial de Paita Alta. Nos basamos en estudios previos como la zonificación sísmica geotécnica de la ciudad de Paita (IGP) y también

mediante la aplicación de técnicas de exploración como calicatas y ensayo de laboratorio.

a) Exploraciones a cielo abierto

Se realizó excavaciones de 3 calicatas aproximadamente a 1.50 metros de profundidad (estudio de mecánica de suelos para fines de pavimentación) en la zona industrial de Paita alta. Con la finalidad de inspeccionar los estratos del suelo y obtener muestras para ensayarlas, en laboratorio.

Tabla N°3

Ubicación de calicatas

Calicata	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m.s.n.m)	Profundidad (m)	Nivel Freático
C_01	490553.00	9438007.00	76	1.5	N. P
C_02	490526.00	9437974.00	76	1.5	N. P
C_03	490498.00	9437987.00	75	1.5	N. P

Fuente: Elaboración Propia



Figura 28. Excavación de Calicatas

Fuente: Elaboración Propia



Figura 29. Ubicación de calicatas
Fuente: Elaboración Propia (Google Earth)

Según CENEPRED en su informe de “Evaluación de Riesgo por inundaciones de Paita”, la zona presenta suelos colapsables que contienen sales y sulfatos conglomerados con carbonatos. Los cuales, al saturarse, debido a las altas precipitaciones de la zona, presentan cambios volumétricos que generan inestabilidad. En la exploración de campo, a partir de profundidades aproximadamente de 0.40 metros, se encontró conglomerados (mezclas de cantos rodados de hasta 2 pulgadas y restos calcáreos en proceso de meteorización en matriz areno limo arcilloso), de color beige muy claro y de consistencia poco compacta. (Ver figura 30). Asimismo, de las calicatas se extrajeron 03 muestras con el fin realizar ensayos de suelos como: granulometría, límites de atterberg, humedad natural, clasificación SUCS, gravedad específica de sólidos, etc., para conocer sus propiedades físicas - mecánicas.



Figura 30. Conglomerados Calcáreos
Fuente: Elaboración Propia

- Densidad del suelo in situ (Norma D1556)

Con la finalidad de obtener la compactación y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales, se realizó el ensayo de densidad de campo a través del método del cono de arena. (Ver figura 31)

Tabla N°4

Densidad In situ

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Densidad Seca (gr/cm ³)	Densidad Húmeda (gr/cm ³)	Humedad (%)
C_03	M_01	1.00	1.43	1.55	8

Fuente: Elaboración Propia



Figura 31. Ensayo de Cono de Arena a 1 metro de profundidad

Fuente: Elaboración Propia

b) Ensayos de Laboratorio

La investigación de campo incluyó la recolección de muestras en la zona Industrial de Paita Alta. Asimismo, se obtuvo muestras de suelo para los ensayos de clasificación estándar. No se encontró nivel freático. Se realizó una serie de pruebas de laboratorio a las muestras seleccionadas, como contenido de humedad, densidad, límites de consistencia, análisis granulométrico por tamizado y ensayo de Proctor y CBR.

Las propiedades fundamentales a tomar en cuenta son:

- Granulometría (NTP 339.28)

Según MTC (2014) “El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño.” (p.33)

Se realizó el análisis granulométrico en las muestras de las tres calicatas obteniendo las siguientes curvas granulométricas. “Los suelos colapsables suelen estar formados por arena y limo ligeramente cementados con partículas de arcilla” (Bahmyari, Ajdari, & Vakili, 2021), se puede apreciar que el suelo en estudio presenta características granulométricas de un suelo colapsable.

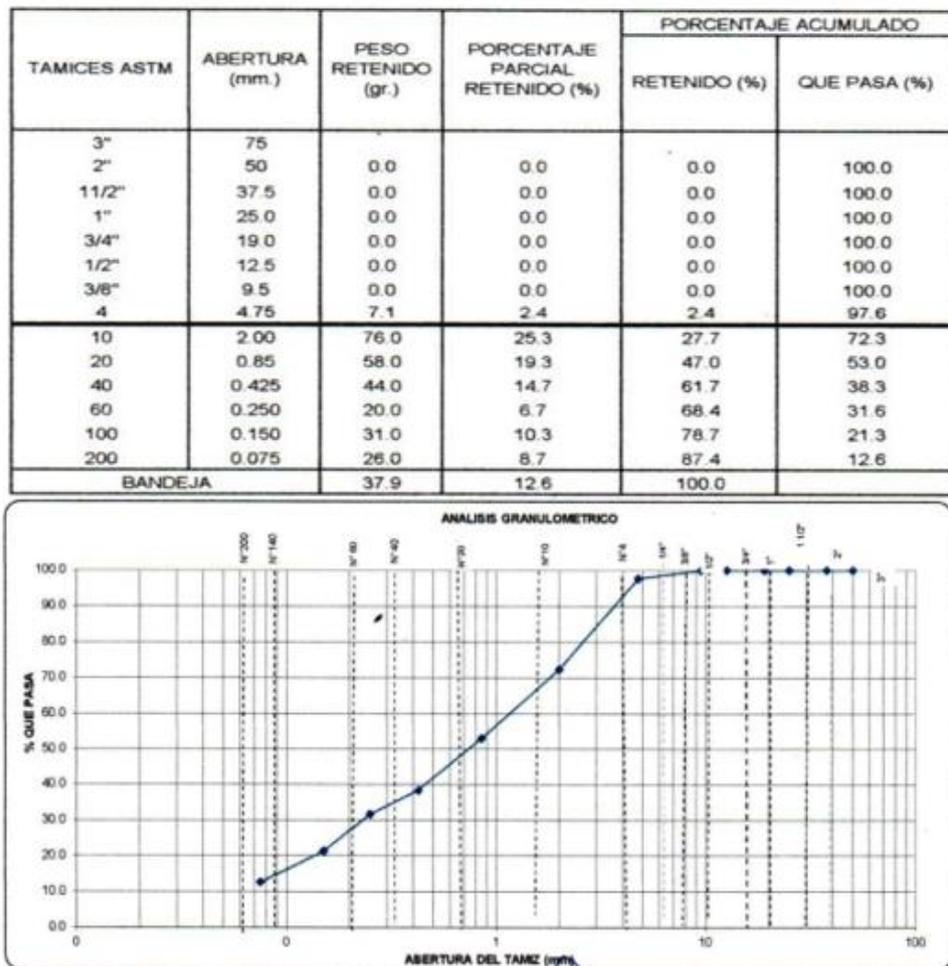


Figura 32. Análisis Granulométrico por Tamizado C-1 M-1
Fuente: Elaboración propia

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm.)	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO	
				RETENIDO (%)	QUE PASA (%)
3"	75				
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	37.5	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0
4	4.75	6.0	2.0	2.0	98.0
10	2.00	68.0	22.7	24.7	75.3
20	0.85	57.0	19.0	43.7	56.3
40	0.425	41.0	13.7	57.3	42.7
60	0.250	25.0	8.3	65.7	34.3
100	0.150	34.0	11.3	77.0	23.0
200	0.075	33.0	11.0	88.0	12.0
BANDEJA		36.0	12.0	100.0	

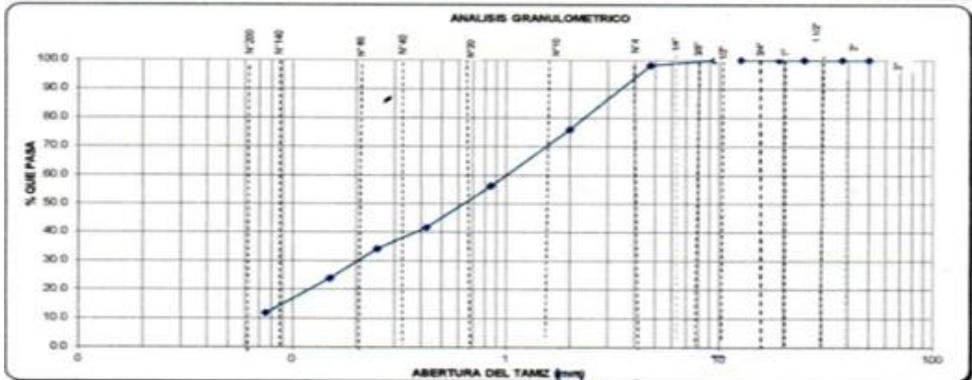


Figura 33. Análisis Granulométrico por Tamizado C-2 M-1
Fuente: Elaboración propia

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm.)	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO	
				RETENIDO (%)	QUE PASA (%)
3"	75				
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	37.5	0.0	0.0	0.0	100.0
1"	25.0	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0
4	4.75	5.4	1.8	1.8	98.2
10	2.00	67.0	22.3	24.1	75.9
20	0.85	59.0	19.7	43.8	56.2
40	0.425	44.0	14.7	58.5	41.5
60	0.250	22.0	7.3	65.8	34.2
100	0.150	31.0	10.3	76.1	23.9
200	0.075	36.0	12.0	88.1	11.9
BANDEJA		35.6	11.9	100.0	

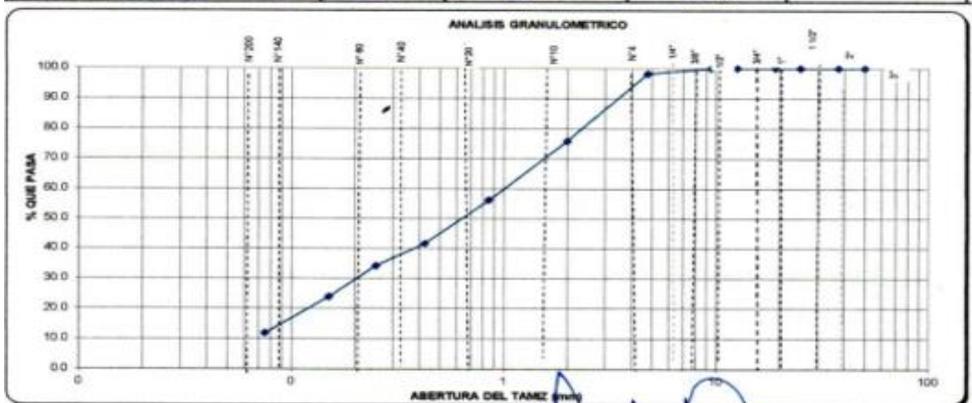


Figura 34. Análisis Granulométrico por Tamizado C-3 M-1
Fuente: Elaboración propia

Según las figuras 32, 33 y 34 se puede determinar que las 3 muestras presentaron un Tamaño nominal de 3/8" (9.5mm) y tamaño máximo nominal de 4" (4.75 mm). Además, están conformadas por un mayor porcentaje de Arena, regular contenido de finos y escaso contenido de Grava.



Figura 35. Análisis Granulométrico
Fuente: Elaboración Propia

- Plasticidad

“Es la propiedad de estabilidad que representa los suelos hasta cierto límite de humedad sin disgregarse”. (MTC, 2014, p. 33) Para determinar la plasticidad se estudió únicamente sus elementos finos. Se realizaron los ensayos de Límite Líquido ASTM D-4318, MTC E 110 y Límite Plástico ASTM D-4318, MTC E 111 obteniendo los siguientes resultados:

Tabla N°5
Resumen de Límites de Atterberg

Ubicación	Muestra	Límites (%)		
		L.L	L.P	I.P
Calicata 1	M1	25.5	13	12.5
Calicata 2	M2	28.3	17	11.3
Calicata 3	M3	29.1	16	13.1

Fuente: Elaboración Propia

Límite Líquido ASTM D-4318, MTC E 110



Figura 36. Ensayos de límite líquido
Fuente: Elaboración propia

Límite Plástico ASTM D-4318, MTC E 111



Figura 37. Ensayos de límite plástico
Fuente: Elaboración propia

Según la tabla N°5 se tiene unos índices de plasticidad de 12.5, 11.3 y 13.1. unos valores de limite líquido de 25.5, 28.3 y 29.1. Knodel (1992) indica que “los suelos colapsables tienen limites líquidos por debajo de 45 e índices de plasticidad por debajo de 25. (p2)”; por lo tanto, estos resultados cumplen con este criterio.

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	suelos arcillosos
IP < 7	Baja	suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	suelos exentos de arcilla

Figura 38. Clasificación de suelos según índice de plasticidad

Fuente: “Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos “, por MTC. (2014, p.34)

Según la figura 38 los resultados nos indican que el suelo en estudio presenta plasticidad media. Por lo tanto, presenta arcillas, las cuales pueden ser un elemento riesgoso en un suelo de sub rasante y en una estructura de pavimento, porque “exhiben un comportamiento plástico, lubricando las partículas de arena y permitiendo que se deslicen unas sobre otras con mayor facilidad lo que da lugar a un asentamiento del suelo” (Bahmyari, Ajdari, & Vakili, 2021, p. 2)

- Humedad Natural

Según el MTC, 2014 “La resistencia de los suelos de sub rasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten.” (p.35). Se realizó un comparativo de la Humedad Natural y la Humedad Óptima que se obtuvo en los ensayos Proctor para obtener el CBR del suelo.

Tabla N°6

Humedad Natural y Humedad Óptima

Ubicación	Muestra	Humedad (%)	
		Natural	Óptima
Calicata 1	M1	14.79	9.10
Calicata 2	M1	8.53	7.45
Calicata 3	M1	8.12	8.31

Fuente: Elaboración Propia

Según la Tabla N°6, en los resultados obtenidos en las calicatas 1 y 2, la humedad natural resulta mayor a la humedad óptima. Por lo tanto, según (MTC, 2014) se propondría, aumentar la energía de compactación, airear el suelo, o reemplazar el material saturado. En la muestra de la C-3 la humedad

natural es menor a la humedad óptima por lo que se recomienda la compactación normal del suelo y el aporte de la cantidad conveniente de agua; sin embargo, la variación es mínima por lo que no será complejo realizar dicho procedimiento.

- Clasificación de Suelos

Tabla N°7

Clasificación de Suelos

Ubicación	Muestra	Clasificación	
		SUCS	ASTHO
Calicata 1	M1	SC	A-2-6 (0)
Calicata 2	M2	SP-SC	A-2-6 (0)
Calicata 3	M3	SP-SC	A-2-6 (0)

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados de la Tabla N°7 obtenidos en laboratorio podemos clasificar el suelo de la Zona Industrial de Paita alta como arenas pobremente graduadas y arenas arcillosas. A continuación, se muestra un cuadro resumen de los ensayos estándar de laboratorio:

Tabla N°8

Resumen de los ensayos estándar de laboratorio

Ubicación	Muestra	Granulometría			Límites (%)			W	SUCS
		Grava	Arena	Finos	L.L.	L.P.	I.P.		
Calicata 1	M1	2.4	85	12.6	25.5	13	12.5	14.79	SC
Calicata 2	M2	2	86	12	28.3	17	11.3	8.53	SP-SC
Calicata 3	M3	1.8	86.3	11.9	29.1	16	13.1	8.12	SP-SC

Fuente: Elaboración Propia

En resumen, según los resultados de la Tabla N°8, estos suelos son arenas arcillosas pobremente gradadas, las cuales, presentan un índice de plasticidad promedio (IP) de 12.5, 11.3 y 13.1 por lo tanto, según (MTC, 2014) este suelo es arcilloso. Asimismo, presenta un porcentaje de Finos promedio de 11.63

% y, contenido de Humedad promedio es 8.58%. y densidad natural seca de 1.43 g/cm³.

- Ensayos Químicos

Tabla N°9

Resultado de ensayo de Cloruros, Sales Solubles y Carbonatos

Ubicación	Muestra	Sulfatos (SO ₄) (%)	Sales Solubles (S.S) (%)	Carbonatos (CaCO ₃) (%)
Calicata 1	M1	-	1.78	43.70
Calicata 2	M2	0.090	1.24	47.80
Calicata 3	M3	0.130	1.64	48.21

Fuente: Elaboración Propia

Según la Tabla N°9 a partir de las muestras de las calicatas C-1; C-2 Y C-3, para efectos de esta investigación se ha seleccionado la muestra de la C-3 como la más representativa y analizada obteniendo los siguientes resultados:

- Una concentración de Sulfatos de 0.13% valor menor que 0.2%, indica que ocasionara ataque químico con severidad moderada al concreto de la cimentación o pavimento. Según MTC (2014) el suelo en estudio es apto para estabilizarse con cemento.
- La presencia de Sales Solubles Totales es de 1.64%, valor que se encuentra por encima de 1.5%. Lo que indica que SI ocasionará problemas de pérdida de resistencia mecánica por problemas de lixiviación (lavado de sales).
- Según el informe publicado por la sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (2012) en el XXVI Reunión de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, se señala: “Se concluye que la presencia del contenido de carbonatos por arriba del 50% tendera a producir una menor capacidad de carga por fricción y punta de los pilotes de cimentación, por lo que no deben escatimarse esfuerzos en su interpretación”. Por lo que se concluye que la presencia de carbonatos en el área en estudio es MODERADA.

Se concluye que el estrato de suelo que forma parte del pavimento contiene concentraciones perjudiciales de sales solubles totales, y moderadas de sulfatos y carbonatos.

- Proctor Modificado y CBR

Se determino el valor soporte o resistencia del suelo (CBR), que estará referido al 95% de la MDS (Máxima Densidad Seca) y a una penetración de carga de 2.54 mm.

Tabla N°10

Valores de Proctor Modificado y CBR

Ubicación	Muestra	Proctor Modificado		CBR (0.1")	
		Contenido Óptimo de Humedad %	Densidad seca máxima g/cm ³ (DSM)	Al 95% de la DSM	Al 100% de la DSM
Calicata 1	M1	9.10	1.788	8.7	9.91
Calicata 2	M1	8.05	1.782	5.7	10.9
Calicata 3	M1	8.31	1.806	6.0	9.01

Fuente: Elaboración Propia

Categorías de Sub rasante	CBR
S ₀ : Sub rasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Sub rasante insuficiente	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Sub rasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Sub rasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Sub rasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Sub rasante Excelente	CBR ≥ 30%

Figura 39. Categorías de Sub rasante
Fuente: Elaboración Propia

Se toma un promedio de la C-2 Y C-3 y se descarta la C-1 por tener un valor de CBR alejado, obteniendo un promedio de %5.85. Según (MTC, 2014) la subrasante es INSUFICIENTE. Por lo tanto, se debe buscar estabilizar el terreno mediante su remplazo por rellenos controlados o mejoramiento de las propiedades del suelo con el empleo de productos químicos, procedimientos mecánicos, o una estabilización con geosintéticos. Los cuales se detallarán en el siguiente objetivo.

- Identificación de suelos colapsables

El potencial de colapso, I_c , se utiliza para estimar el asentamiento que pudiera ocurrir en una capa del suelo. Se inserto los valores de los resultados del laboratorio en la siguiente tabla “Criterios del potencial de colapso” E.050 (2018), que se encuentra en función al Limite Líquido (LL) y del peso volumétrico seco (γ_d).

Para efectos de esta investigación se ha seleccionado la muestra de la C-3 como la más representativa y analizada obteniendo los siguientes resultados:

Tabla N°11

Parámetros para la relación entre los colapsables y no colapsables

Punto de exploración	Límite líquido (%)	Densidad Seca (gr/cm ³)
C-3	29.1	1.43

Fuente: Elaboración Propia

El análisis de los resultados de laboratorio puede ser utilizados para reconocer estos tipos de suelos problemáticos. Las propiedades como el peso unitario seco y el límite líquido son usadas para estimar el potencial de colapso. Del gráfico recomendado por la E-050, utilizando los resultados de Tabla N°11, se obtuvo lo siguiente para la muestra representativa C-3.

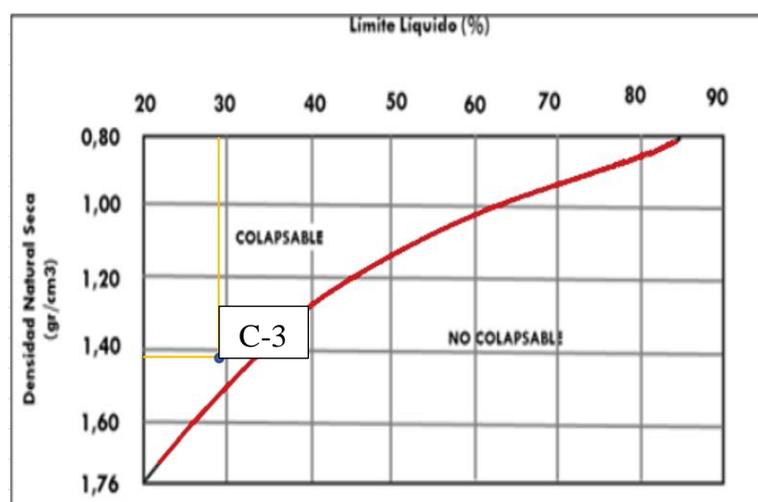


Figura 40. Criterios del potencial de colapso
Fuente: E-050 Suelos y Cimentaciones.

Según la Figura 40, el análisis preliminar según la norma e.050 da como resultado que el suelo es colapsable.

Asimismo, el gráfico recomendado por la U.S.B.R. mencionado por Carrillo (1991) es más específico respecto al rango del potencial de colapso, como se muestra en la siguiente figura:

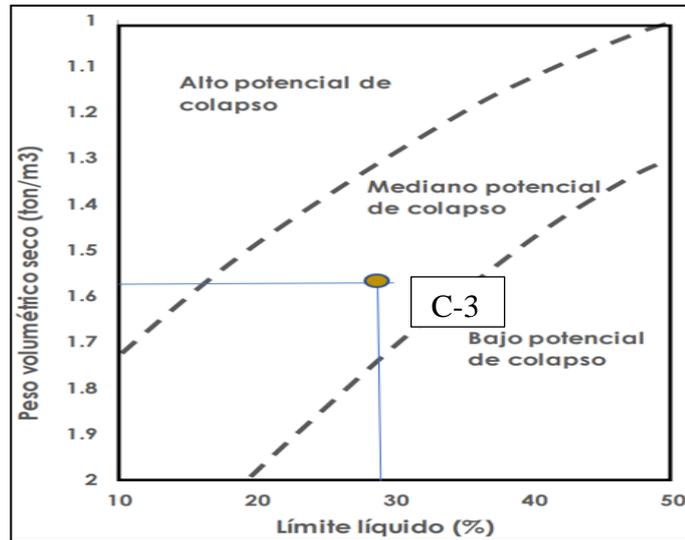


Figura 41. Criterio para medir el potencial de colapso
Fuente: Carrillo (1991)

La Figura 41 presenta los niveles del potencial de colapso para los suelos analizados, se tiene entonces un mediano potencial de colapso para la muestra más representativa C-3.

Con el objetivo de catalogar el potencial de colapso de los suelos, una gran diversidad de criterios ha sido propuestos en la investigación. Varios de estos criterios establecen la condición crítica del colapso basado en la relación de vacíos, la densidad seca y el grado de saturación, límites de consistencia, contenido natural de agua y el porcentaje de partículas finas. A continuación, se muestran los valores de las propiedades intrínsecas de la muestra representativa C-3.

Tabla N°12

Parámetros determinados por ensayos de laboratorio

Ubicación Muestra	Gs	γ_d	w	γ	L.L	L.P	I.P
		(gr/cm ³)	(%)	(gr/cm ³)	(%)	(%)	(%)
Calicata 3 M-1	2.54	1.43	8	1.55	29.1	16	13.08

Fuente: Elaboración propia

A partir de los datos de la Tabla N°12 se determinan los valores de relación de vacíos, relación de vacíos en el límite líquido, el grado de saturación y los diferentes coeficientes “K” para los criterios de identificación de suelos colapsables.

- $\gamma = \frac{Gs(1+W\%)*\gamma_{agua}}{1+e}$; cálculo de la relación de vacíos “C-3” $e = 0.77$
- $eL = LL*GS$; cálculo de la relación de vacíos en el límite líquido
 $eL = 0.29*2.54$ $eL = 0.74$
- $GS * W = S * e$; cálculo del grado de saturación “S” $S = 26.40\%$
- $n = e/(1+e)$; cálculo de la porosidad “n” $n = 44\%$

A continuación, en la Figura 42 se muestra de forma gráfica la relación de fases para el suelo en condiciones naturales, colocando al lado derecho las unidades de volumen; para los sólidos compuesto por las arenas, arcillas y mínimas gravas representan el 0.56, para el contenido de agua representa el 0.11 y para los poros o contenido de aire representa el 0.33:

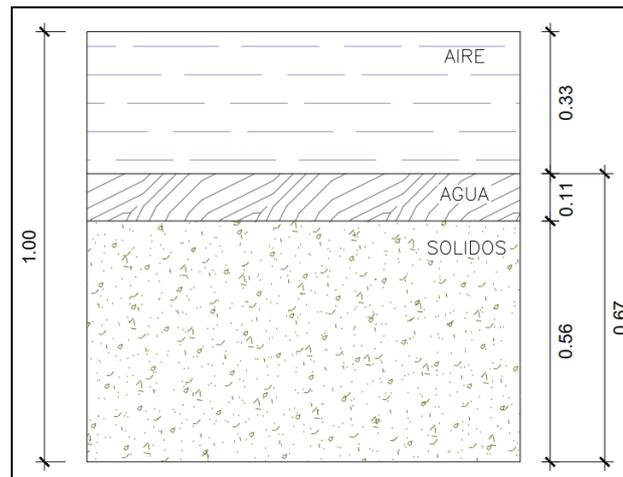


Figura 42. Relación de fases del suelo en condiciones naturales
 Fuente: Elaboración Propia

Seguidamente, se presentan diferentes criterios para la identificación de suelos colapsables mediante sus propiedades índices para la muestra más representativa C-3, estos criterios han sido expuestos en la Tabla N°13.

Tabla N°13

Criterios de identificación de suelos colapsables según diversos autores

criterio	Intervalo de decisión	Valor de criterio
		M3
	K=0.5 - 0.75: Muy colapsable	
Denisov (1951)	K=1.00: limo arcilloso no colapsable	0.96
	K=1.00 - 2.00: Suelos no colapsables	
Cleverger (1958)	yd < 12.6 KN/m3 el asentamiento será grande	14.02
	yd < 14.1 KN/m3 el asentamiento será pequeño	
	Kp < 0: Suelo muy colapsable	
Prikloński (1952)	Kp > 0.5: Suelo no colapsable	-0.60
	Kp > 1.0: Suelo expansivo	
Gibbs (1961)	K > 1 Suelo propenso al colapso	0.27
Sovietic Building	Cuando el “Sr” < 60%	0.02
Code (1962)	Si coef. L > -0.1, Suelo considerado colapsable	
Fedá (1964)	Sr < 100%	-0.91
	K _L > 0.85, Suelo colapsable	

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla N°13 presenta considerables investigaciones y criterios de potencial de colapso. La opinión propuesta por Denisov (1951) usa el coeficiente de asentamiento K, el cual resulta de la división de la relación de vacíos en el límite líquido y la relación de vacíos natural. Conforme a este criterio si el coeficiente K está en el intervalo de 0.5 a 0.75 los suelos presentan alto potencial de colapso. Sin embargo, si el coeficiente está en el intervalo de 1.00 a 2.00, los suelos no son colapsables. Para la muestra 3 ensayada los resultados de laboratorio indican un valor de K = 0.96, por lo tanto, es clasificado como suelo no colapsable.

En relación con lo que se menciona Cleverger (1956) planteo el criterio de colapso en términos de la densidad seca. Basado en las investigaciones en suelos loess en Missouri, el concluyó que al humedecer suelos con densidades menores a 12.6 KN/m3, estos presentan grandes asentamientos y tienen bajas resistencia al corte, por el contrario, si la densidad seca es mayor a 14.1 KN/m3, los suelos son capaces de soportar las cargas asignadas. Para la

muestra 3 ensayada los resultados de laboratorio muestran un peso específico seco mayor a 14.1 KN/m³, por lo tanto, el asentamiento será pequeño.

Con respecto al criterio de Priklnski (1952) emplea el índice de liquidez para estimar el grado de colapso. Especialmente si el índice de liquidez K_D , es menor a cero, los suelos tienen una alta colapsabilidad porque se encuentran en un estado seco y son susceptibles a la infiltración de agua. Si el índice de liquidez es mayor a 0.5 los suelos no son colapsables. Para la muestra ensayada más representativas M3 se obtienen un valor negativo de $K_D = -0.60$, lo que comprueba el potencial de colapso de este suelo.

En cuanto a los criterios propuestos en la bibliografía rusa el Sovietic building code, mide el potencial de colapso basado en un parámetro denominado L, que depende de la relación de vacíos natural y la relación de vacíos en el límite líquido (ver Tabla N°13). Para un grado de saturación natural menor a 60%, si $L > -0.1$, los suelos son considerados colapsables. Se presenta valor positivo en la muestra M3 representativa, por lo que se definen suelos colapsables.

Gibbs (1961) propuso la medición del colapso de manera gráfica, la cual depende del cociente del contenido de agua durante la saturación total y el límite líquido. Cuando este cociente K, es mayor a uno (Caso I) la saturación conlleva al estado más débil del suelo, ya que el volumen de vacíos es suficiente para causar el colapso del suelo. Si K es menor a 1, el volumen de vacíos es insuficiente para almacenar el agua requerida para llegar al límite líquido, por lo que el suelo permanece en estado plástico y tiene mayor resistencia al corte (Caso II). De lo contrario si $K=1$, esto indica que el volumen de vacíos es suficiente para mantener el contenido de humedad en el límite líquido. Se calculo el colapso de manera grafica según el límite líquido y la densidad natural seca resultando un suelo colapsable, además la relación de vacíos de 0.77 es moderado.

Finalmente, Feda (1964) aplicó un criterio similar al de Priklnski (1952), sin embargo, este autor consideró el grado de saturación de los suelos. Feda propuso que para un grado de saturación menor a 100% el potencial de colapso es significativo si K_L es mayor a 0.85 (que corresponderían a suelos con una porosidad mayor a 40%). Los resultados muestran indicadores

menores a 0.85, en consecuencia, para Feda es suelo no colapsable, sin embargo, los resultados de porosidad son mayores al 40%.

De acuerdo a los resultados obtenidos por los criterios de identificación presentados en la Tabla N°13, es apropiado indicar que para esta investigación las muestras en estudio presentan las características típicas de un suelo colapsable especialmente la muestra M-3.

Por ende, se procede a la verificación de la existencia o no de la colapsabilidad mediante los resultados del ensayo de colapsabilidad para la medición del potencial de colapso de suelos NTP 339.163.

Se llegó a ejecutar un ensayo de determinación del potencial de colapso de un suelo, a través del ensayo normalizado NTP 339.163, que nos presenta la escala de medida del grado de potencial de colapso como se detalla en la Tabla N°14, este ensayo se realizó para una densidad natural de 1.43g/cm³, para una profundidad de 1.10m y un contenido de humedad natural del 8%. Para una presión aplicada máxima de 6 (kg/cm²) ejercida por los neumáticos.

Tabla N°14

Grado de potencial de colapso

CP (%)	Severidad del problema
0 a 1	No colapsa
1 a 5	Colapso moderado
5 a 10	Colapso
10 a 20	Colapso severo
>20	Colapso muy severo

Fuente: NTP 339.163

Según la Tabla N°14 el suelo de estudio se establece la severidad del problema de colapsabilidad luego mediante ese criterio se determina el grado de potencial de colapso “colapso moderado”.

5.2. Selección de los tipos de estabilizadores

En la selección de los tipos de estabilizadores es necesario plantear una solución que se ajuste a los criterios técnicos de la normatividad vigente, buscando una solución óptima que sea viable económicamente y que no genere retrasos o alteración del cronograma para la ejecución del proyecto. Para ello se cuenta con diferentes alternativas de mejoramiento o estabilización de suelos como por ejemplo relleno controlado con material de préstamo, estabilización con cal y cemento, geosintéticos, entre otros. Por consiguiente, se realiza un análisis de estabilizadores químicos como una posible solución y medida de estabilización en el ámbito de la ingeniería de pavimentos para suelos colapsables, el cual se desempeña como terreno de fundación para pavimentos industriales. Mediante la investigación teórica y recopilación de información técnica, se obtienen los parámetros físicos, mecánicos y químicos. Se procede a generar alternativas viables en relación con la mejora del suelo colapsable, donde con base a los datos obtenidos, se busca determinar la viabilidad de incluir geosintéticos de refuerzo o separación. Se investigo los estabilizadores químicos mayormente utilizados son la cal y cemento como soluciones de tratamiento para mejorar las propiedades del suelo colapsable. Según MTC (2014) establece que los factores que se deben considerar al seleccionar el método más conveniente de estabilización son: tipo de suelo a estabilizar, uso propuesto del suelo estabilizado, experiencia en la estabilización que se aplicará y disponibilidad del aditivo estabilizador y costos.

La selección de estos materiales se debe a su gran experiencia en su uso, disponibilidad y bajo costo en comparación con otras alternativas. Además el cemento, el cual ha sido utilizado en todo el mundo para aumentar la resistencia de los suelos colapsables al tiempo que reduce su permeabilidad (Croft , 1967).

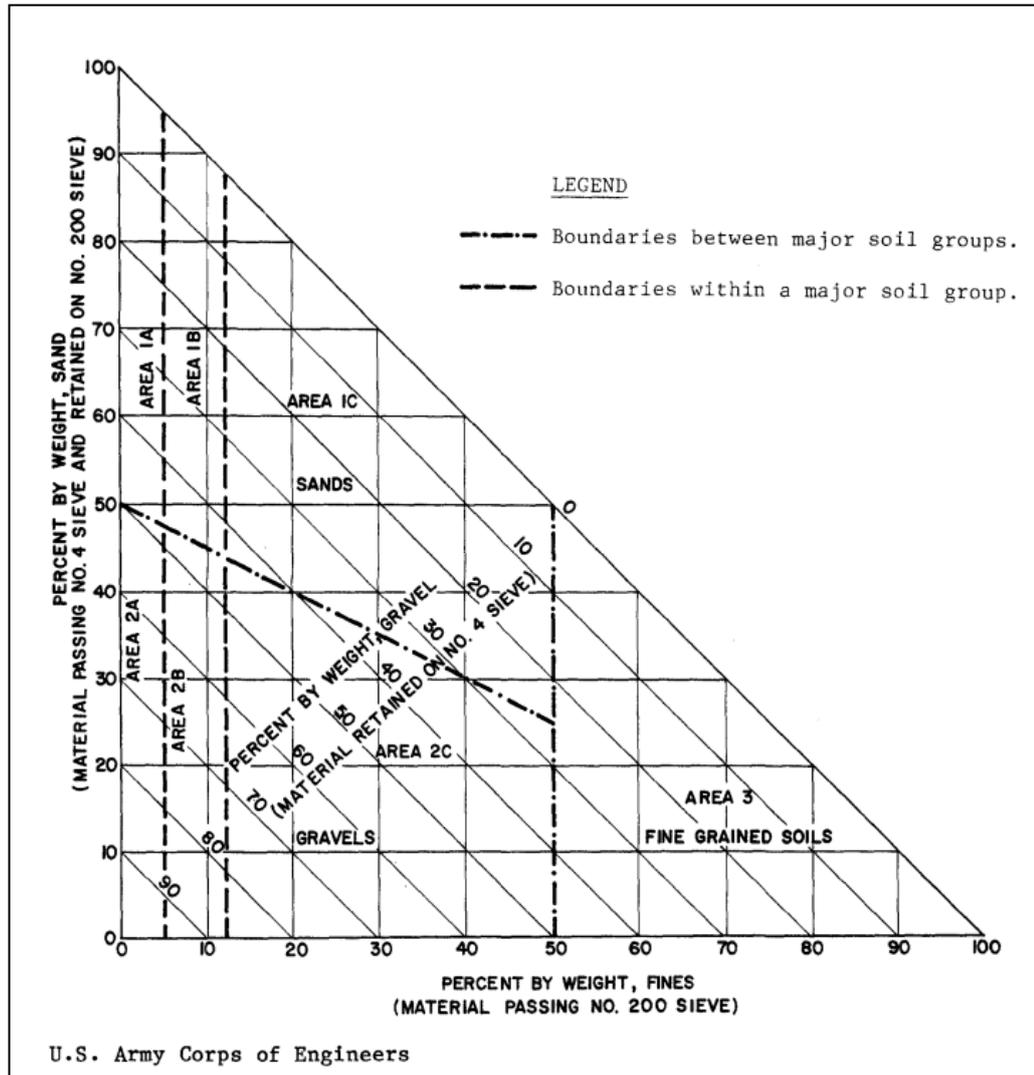


Figura 43. Triángulo de gradación para seleccionar un agente estabilizador
Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.9)

En la Figura 43 se presenta el triángulo de gradación del suelo, que refiere a las cualidades de la pulverización del suelo que, al combinarse con ciertas delimitaciones relativas al límite líquido, el índice de plasticidad y la calificación de la distribución granulométrica del suelo, suministran un modelo para escoger el aditivo más apropiado para la estabilización. El resultado del triángulo nos determina el área en la que cae la gradación del suelo. El área (IA, 2C, 3 etc.). En consecuencia, se obtiene el Área 1B.

Area	Soils Class. ^a	Type of Stabilizing Additive Recommended	Restriction on LL and PI of Soil	Restriction on Percent Passing No. 200 Sieve ^a	Remarks
1A	SW or SP	(1) Bituminous (2) Portland Cement (3) Lime-Cement-Fly Ash	PI not to exceed 25		
1B	SW-SM or SP-SM or SW-SC or SP-SC	(1) Bituminous (2) Portland Cement (3) Lime (4) Lime-Cement-Fly Ash	PI not to exceed 10 PI not to exceed 30 PI not less than 12 PI not to exceed 25		
1C	SM or SC or SM-SC	(1) Bituminous (2) Portland Cement (3) Lime (4) Lime-Cement-Fly Ash	PI not to exceed 10 ---b PI not less than 12 PI not to exceed 25	Not to exceed 30 percent by weight	
2A	GW or GP	(1) Bituminous (2) Portland Cement (3) Lime-Cement-Fly Ash	PI not to exceed 25		Well-graded material only Material should contain at least 45 percent by weight of material passing No. 4 sieve
2B	GW-GM or GP-GM or GW-GC or GP-GC	(1) Bituminous (2) Portland Cement (3) Lime (4) Lime-Cement-Fly Ash	PI not to exceed 10 PI not to exceed 30 PI not less than 12 PI not to exceed 25		Well-graded material only Material should contain at least 45 percent by weight of material passing No. 4 sieve
2C	GM or GC or GM-GC	(1) Bituminous (2) Portland Cement (3) Lime (4) Lime-Cement-Fly Ash	PI not to exceed 10 ---b PI not less than 12 PI not to exceed 25	Not to exceed 30 percent by weight	Well-graded material only Material should contain at least 45 percent by weight of material passing No. 4 sieve
3	CH or CL or MH or ML or OH or OL or ML-CL	(1) Portland Cement (2) Lime	LL less than 40 and PI less than 20 PI not less than 12		Organic and strongly acid soils falling within this area are not susceptible to stabilization by ordinary means

Figura 44. Tabla para seleccionar un agente estabilizador

Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.9)

De la figura 44 se establece que para el suelo en estudio perteneciente al Área 1B con clasificación (SP-SC) e índice de plasticidad mayores a 12 y menores de 30; los tipos de estabilizadores como la cal y el cemento si se pueden emplear.

Estabilizadores Químicos

Las capas de suelo en una estructura de Pavimento deben alcanzar los niveles de calidad especificados. A medida que se incrementa la calidad de una capa de suelo, la capacidad de esta capa para distribuir la carga sobre un área mayor generalmente se incrementa lo suficiente como para permitir una reducción en el espesor requerido del suelo y superficie. (Army, 1984)

Es habitual emplear estabilizadores químicos para mejorar la calidad del suelo, para reducir el índice de plasticidad, potencial de hinchamiento, aumento de durabilidad y resistencia. Estos tipos de mejora de la calidad del suelo se denominan modificaciones del suelo.

Quando se mejoran las propiedades mecánicas a través del empleo de aditivos de una capa de pavimento, como su resistencia a la tracción y la rigidez. Se puede reducir el espesor de la capa estabilizada y de las capas superpuestas dentro del sistema de pavimento.

El suelo en estudio presento un CBR<6% con respecto al 95% de máxima densidad seca, por lo que es necesario mejorar sus propiedades mecánicas de resistencia mediante la estabilización.

El material estabilizado debe cumplir con los requerimientos de durabilidad y requerimientos mínimos de resistencia a la compresión no confinada para cemento, cal y cal-cemento-cenizas volantes combinadas en suelos estabilizados. (Ver Tabla N°15).

Tabla N°15

Resistencias mínimas a la compresión no confinada

Minimum Unconfined Compressive Strength, Psi		
Stabilized Soil Layer	Flexible Pavement	Rigid Pavement
Base Course	750	500
Subbase course	250	200
Select material or subgrade		

Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.2)

Como se visualiza en la Tabla N°15, la resistencia a la compresión mínima para una capa estabilizada de subrasante para un pavimento rígido determinada a los 7 días para cemento estabilización y 7 o 28 días para cal o cal-cemento-cenizas volantes es de 200 Psi.

Estabilización con Cemento:

El cemento puede utilizarse tanto para modificar o mejorar la calidad del suelo. La cantidad de aditivo de cemento dependerá de si el suelo debe ser modificado o estabilizado.

Contenido de cemento para la modificación de suelos: La cantidad de cemento va a depender si el objetivo es modificar la calidad, gradación o si el suelo en estudio se encuentra en zonas heladas.

El contenido de cemento se determina mediante el método de ensayo y error. Si se desea reducir el IP del suelo se deben preparar muestras sucesivas de mezclas de suelo-cemento se utilizará el ensayo de referencia de los procedimientos ASTM D 423 Y ASTM D 424. Se selecciona el contenido mínimo de cemento que produce el IP deseado, pero como se determinó en base a la fracción menos 40 del material, este valor debe ser ajustado para encontrar el contenido de cemento de diseño en base al peso total de la muestra expresado como la siguiente ecuación.

$$A=100Bc$$

A= Contenido de cemento de diseño.

B= Porcentaje que pasa el tamiz n^a40, expresado en decimales.

C= Porcentaje de cemento necesario para obtener el IP deseado de menos 40 material, expresado como decimal.

Contenido de cemento para la estabilización de suelos: En la presente investigación se opta por estabilizar el suelo, debido a que la subrasante es inadecuada.

Según Army (1984) para estabilizar el suelo con cemento se deben seguir los siguientes pasos.

a) El suelo a nivel de subbase y base debe cumplir con los requisitos de gradación mostrados en la figura 45.

Type Course	Sieve Size	Percent Passing
Base	2-inch	100
	1-1/2-inch	70-100
	1-inch	45-100
	3/4-inch	--
	1/2-inch	30-90
	No. 4	20-70
	No. 10	15-60
	No. 30	--
	No. 40	5-40
	No. 200	0-20
Subbase	3-inch	100
	No. 4	--
	No. 10	--
	No. 100	--
	No. 200	0-25

Figura 45. Requisitos de gradación

Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.13)

b) Se selecciona un contenido de cemento estimado utilizando la clasificación del suelo (SP-SC) y la máxima densidad seca de las relaciones que es 1.87 gr/cm³ equivalente a 116.72 pcf.

Soil Classification ^a	Initial Estimated Cement Requirement Percent Dry Weight
GW-SW	5
GP, SW-SM, SW-SC, SW-GM, SW-GC	6
GM, SM, GC, SC, SP-SM, SP-SC, GP-GM GP-GC, SM-SC, GM-GC	7
SP, CL, ML, ML-CL	10
MH, OH	11
CH	10

^a Soil classification corresponds to MIL-STD-619.

Figura 46. Requisitos de cemento estimado para varios tipos de Suelos
Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.22)

Table 3-4. Average Cement Requirements for Silty and Clayey Soils

Group Index ^a	Material Between 0.05 and 0.005 mm percent	Cement Content, Percent by Weight Maximum Dry Density, pcf (Treated Material)						
		99-104	105-109	110-115	116-120	121-126	127-131	132 or more
		0-3	0-19	12	11	10	8	8	7	7
	20-39	12	11	10	9	8	8	7
	40-59	13	12	11	9	9	8	8
	60 or more	--	--	--	--	--	--	--
3-7	0-19	13	12	11	9	8	7	7
	20-39	13	12	11	10	9	8	8
	40-59	14	13	12	10	10	9	8
	60 or more	15	14	12	11	10	9	9
7-11	0-19	14	13	11	10	9	8	8
	20-39	15	14	11	10	9	9	9
	40-59	16	14	12	11	10	10	9
	60 or more	17	15	13	11	10	10	10
11-15	0-19	15	14	13	12	11	9	9
	20-39	16	15	13	12	11	10	10
	40-59	17	16	14	12	12	11	10
	60 or more	18	16	14	13	12	11	11
15-20	0-19	17	16	14	13	12	11	10
	20-39	18	17	15	14	13	11	11
	40-59	19	18	15	14	14	12	12
	60 or more	20	19	16	15	14	13	12

^aTaken from figure 3-1

Figura 47. Requerimientos promedio de cemento para suelos limosos y arcillosos
Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.16)

Según las figuras 46 y 47 se estima un porcentaje del 7 % de contenido de cemento según su clasificación y del 8% según su densidad máxima seca.

- c) Utilizando el contenido de cemento estimado, se determina las relaciones de humedad- densidad de la mezcla suelo-cemento. Se empleará el procedimiento de la norma MTC E1102 para preparar la mezcla suelo-cemento y realizar los cálculos necesarios. Para la compactación de la mezcla suelo-cemento se

utilizarán aparatos y procedimientos para la designación de esfuerzo compactación.

- d) Se deben preparar muestras de la mezcla suelo cemento para ensayos de compresión no confinada y de durabilidad a la densidad seca y a los contenidos de cemento determinados del paso anterior.

Estabilización con Cal:

Porcentaje de cal hidratada basado en el peso de suelo seco

El porcentaje necesario de cal dependerá de cuál es el objetivo, en la presente investigación se realiza la estabilización en suelos colapsables. Dicho porcentaje siempre debe especificarse sobre la masa de suelo seco. Por ende, el porcentaje mínimo de cal dependerá de las exigencias para la capa tratada para los suelos colapsables.

Se recomienda el uso de cal hidratada, por su mayor estabilidad, pues es la más sencilla de manipular y almacenar en el laboratorio.

Se determino el 2.5% y 3% de cal hidratada en peso de suelo seco, proyectando la intersección de los valores del índice de plasticidad y el porcentaje que pasa por el tamiz N°40. Los resultados obtenidos dependen de las reacciones químicas, dichas reacciones varían con el porcentaje de cal, la temperatura, el tiempo transcurrido y las condiciones de humedad durante el mismo.

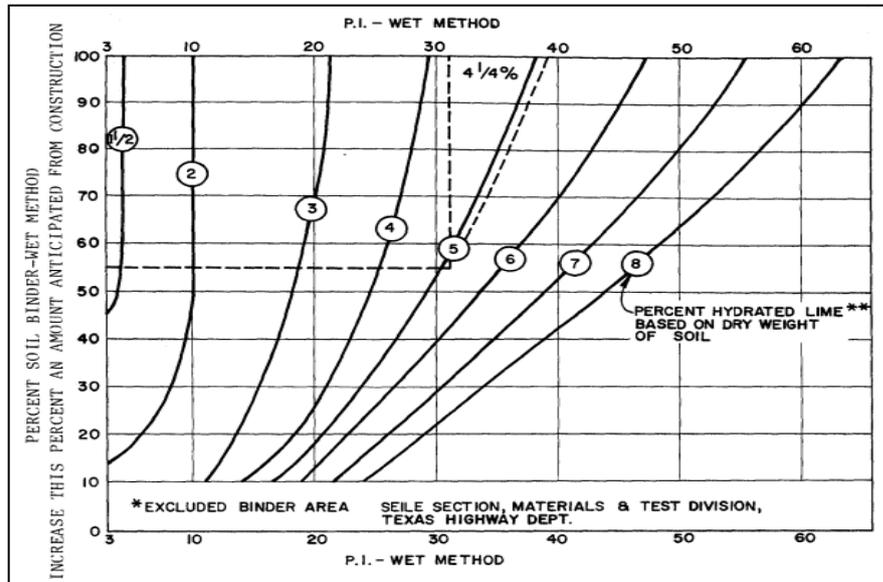


Figura 48. Determinación inicial del contenido de cal

Fuente: "Soil Stabilization for Pavements Mobilization Construction", por Army, U.S (1984, p.20)

Según el ábaco “Determinación inicial del contenido de cal” verificamos el porcentaje de cal hidratada basado en el peso seco del suelo para obtener los porcentajes del 2.5% y 3% para las dosificaciones correspondientes.

Porcentaje óptimo de cal

Este porcentaje es el que permite aprovechar al máximo los efectos de la cal sobre el suelo a tratar, con un sobre costo mínimo. Las modificaciones para el porcentaje óptimo de cal serán aquel que logre al suelo: reducir o incluso anular su índice de plasticidad, disminuir o anular su hinchamiento potencial e incrementar de forma apreciable el índice de CBR del suelo.

Se realizó los ensayos de límites de consistencia (ASTM D 4318) para determinar la incidencia de los estabilizadores en las propiedades físicas, dado que los cambios de los límites plástico y líquido también se convierten en un indicador del contenido de cal deseable. Asimismo, se efectuó el ensayo de CBR (ASTM D 1883) para determinar la incidencia de los estabilizadores en la resistencia del suelo.

En la Tabla N°16 se presentan las propiedades físicas requeridas por el MTC para la selección del tipo de estabilizador según las guías referenciales. (Ver figuras 1, 2)

Tabla N°16

Límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP) y % pasa malla 200

Punto de Extracción	Límite líquido (L.L) %	índice de plasticidad (I.P) %	% pasa malla 200
M1	25.5	12.5	12.6
M2	28.3	11.3	12
M3	29.1	13.1	11.9

Fuente: Elaboración Propia

El objetivo de estabilizar los suelos es modificar sus propiedades físicas, incrementar su resistencia y su durabilidad con el fin de obtener un material de fundación satisfactorio.

5.3. Propuesta del tipo de estabilizador

En la propuesta del tipo de estabilizador se realizará una comparación de los resultados de laboratorio del suelo estabilizado con cal y cemento para analizar la incidencia de los estabilizadores seleccionados en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales.

Por otro lado, los valores de los límites de Atterberg, en combinación con otras propiedades del suelo, se utilizan ampliamente para identificar estos suelos. Muchos suelos colapsables tienen límite líquido por debajo de 45 y índice de plasticidad por debajo de 25. (Knodel, 1992). Los resultados de límites de consistencia de las muestras ensayadas presentan valores límites de consistencia por debajo de lo mencionado (Ver Tabla N°17).

Tabla N°17

Propiedades Físicas y Mecánicas del suelo patrón

Densidad W	Límite	Límite	Índice de	Peso	MDS	OCH	CBR
In situ	%	Líquido	Plástico	Plasticidad	Específico (g/cm ³)	%	95%
1.43	8.53	28.3	17	11.30	2.54	1.948	7.45
							5.85

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N°17 presenta los datos de la muestra de la Calicata 2 como patrón. Se puede observar un CBR<6 por lo que será necesario mejorar las propiedades mecánicas del suelo. Por lo tanto, se realizará el ensayo de CBR en las muestras estabilizadas con cal al 2.5% y 3% y para analizar su incidencia en la resistencia.

Para las mezclas suelo-cemento se llevará a cabo ensayos de CBR para determinar el incremento del porcentaje de la resistencia al corte del suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. También se realiza las pruebas de resistencia a la compresión no confinada a las briquetas de suelo-cemento, a los 7 días de curado. (2 probetas con 7% de cemento y 2 probetas con 8% cemento). Logrando modificar y mejorar la calidad del suelo generando cambios en aumento de su resistencia en consecuencia un incremento de su durabilidad.

Para el caso de la estabilización suelo-cemento se selecciona un contenido estimado de cemento del 7% utilizando la clasificación del suelo (Ver figura 46) y se realiza el ensayo de Relaciones Humedad – Densidad donde se obtiene la máxima densidad seca de 1.87 g/cm² equivalente a 116.74 PCF (lb/ft³).

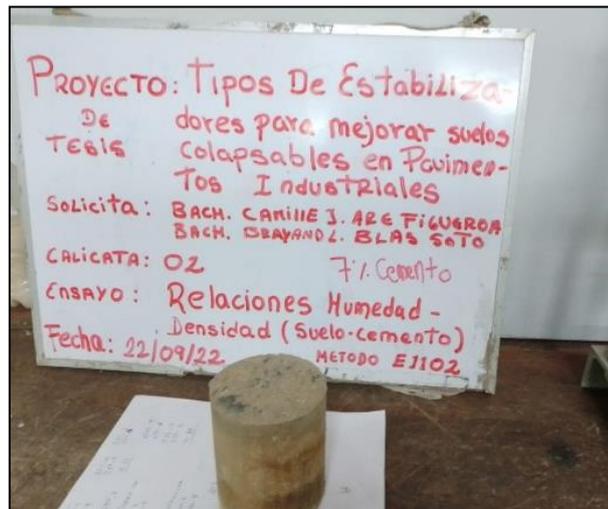


Figura 49. Relaciones Humedad – Densidad del Suelo-Cemento para 7% y 8%
Fuente: Elaboración Propia

Con la máxima densidad seca, índice de grupo y porcentaje de finos. (Ver figura 47) se obtiene un nuevo porcentaje de 8%. Por ende, se obtiene porcentajes de diseño del 7% y del 8% respectivamente, lo cual es un buen indicador porque no presentan un % de variación mayor al 3%. (Army, 1984)

Se debe tener en cuenta que el suelo puede ser modificado o estabilizado con cemento. Se suele modificar cuando se usan porcentajes bajos de cemento del 2% al 3%, mejorando las propiedades del suelo (reduce la susceptibilidad del agua). (Montejo, 2002) En la presente investigación se optó por estabilizar el suelo porque presento un %CBR < 6 mejorando las propiedades del suelo a largo plazo aportándole durabilidad y resistencia a la tracción.



Figura 50. Probetas con 7% cemento y 8% cemento
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 50 se puede apreciar el remoldeo de las probetas de suelo-cemento en los porcentajes de 7% y 8% las cuales se ensayaron a los 7 días y se obtuvieron las resistencias detalladas en la Tabla N°18



Figura 51. Ensayo de Compresión no confinada para briqueta Suelo Cemento
Fuente: Elaboración propia

Tabla N°18

Resistencia a la compresión no confinada Suelo-Cemento 7 días

%	Resistencia a la compresión no confinada 7 días (PSI)		
	Espécimen 1	Espécimen 2	Promedio
7	25.5	12.5	12.6
8	28.3	11.3	12

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la estabilización suelo – cal se empleó el ábaco titulado “Determinación inicial de contenido de cal”. (Ver figura 48) En la intersección de la línea curva del índice de plasticidad con el porcentaje aglutinante que pasa la malla #40 del suelo se identificó los porcentajes de 2.5% y 3% de cal. Para estas mezclas suelo-cal se llevará a cabo ensayos de CBR y límites de consistencia, para determinar el incremento del porcentaje de la resistencia al corte del suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas; además verificar si se logró reducir el índice de plasticidad. Estos resultados dependen de las reacciones químicas, las cuales, dan lugar a un cambio tanto en la composición química como en las propiedades físicas del suelo. Provocando cambios significativos en la plasticidad del suelo; por lo tanto, los cambios en los límites plástico y líquido

Finalmente se realizó los ensayos de límites de consistencia para determinar la incidencia de los estabilizadores en las propiedades físicas, dado que los cambios de los límites plástico y líquido también se convierten en un indicador del contenido de cal deseable.

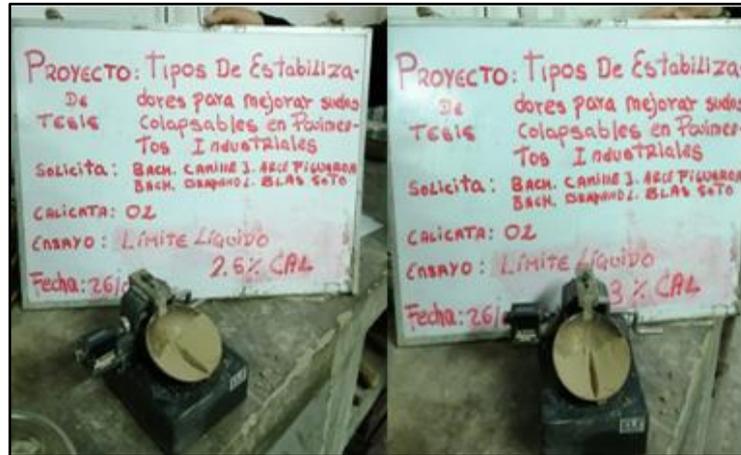


Figura 54. Ensayo “CBR” al (2.5% - 3%) de cal
Fuente: Elaboración Propia.

Se estudiaron las características físicas y mecánicas del suelo en estudio para proponer el tipo de estabilizador que logre mejorar significativamente sus propiedades. Con la finalidad de tener una subrasante que cumpla con los estándares de calidad exigidos por la norma. Además, el suelo en estudio presenta un máximo contenido de carbonatos de 48.21%. Los cuales Ramirez (2021) indica que los carbonatos son minerales arcillosos activos susceptibles a cambios físicos-químicos y son los más propensos al colapso. Por lo tanto, esta resistencia inicial disminuye al incrementar el contenido de humedad porque los materiales cementantes que unía las partículas sólidas del suelo, son disueltos por el agua produciendo un reacomodo de las partículas y con ello un asentamiento. (Flores, 2018) Por lo tanto, también se debe tomar medidas para evitar el incremento del contenido de humedad del suelo colapsable y la contaminación de otras capas con carbonatos, mediante la impermeabilización y la separación de materiales.

Por ello, en función de estas conclusiones se determinó realizar la estabilización química del suelo con el empleo de cemento, que permita mejora su resistencia y propiedades físicas y también se recomienda el empleo de geosintéticos específicamente con la geomembrana para que cumpla con la función de impermeabilización y separación.

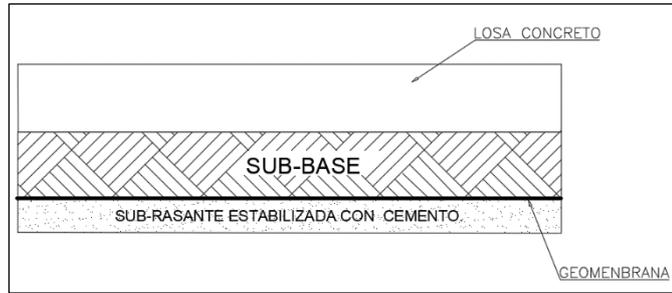


Figura 55. Ejemplo de Estructura de Pavimento
Fuente: Elaboración propia

5.4. Análisis de Resultados

Límites de Atterberg

Se realizaron los ensayos de límite líquido (INV- 125-13) y límite plástico (INV- 126-13) de las diferentes mezclas suelo-cemento y suelo-cal. Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla N°19

Límites de Atterberg de los materiales utilizados

	Material In-Situ (patrón)	Material +2.5% cal	Material +3% cal	Material +7% cemento	Material +8% cemento
LL	28.3	28	28	N.P	N.P
LP	17.0	20	21	N.P	N.P
IP	11.30	8	7	N.P	N.P

Fuente: Elaboración Propia

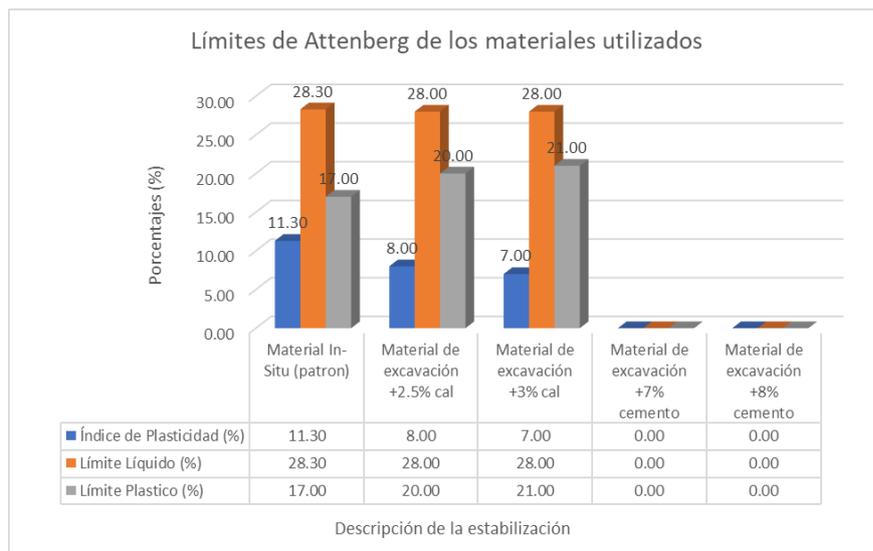


Figura 56. Resultados del IP del suelo con 2.5%, 3% de cal y 7%, 8% de cemento.
Fuente: Elaboración Propia

Según el MTC (2014) uno de los efectos más importantes de la cal en el suelo, es el de cambiar apreciablemente su plasticidad. Por ejemplo, suelos de plasticidad $IP < 15$, aumentan tanto el LL como el LP, y también muy ligeramente su IP; en cambio, en los suelos de plasticidad con $IP > 15$ disminuye el IP. Como se observa en las gráficas el IP “aumento” para un ($IP < 15$), esto se podría generar por un mal muestreo en campo, sin embargo, al tener menor plasticidad es favorable para la estructura del pavimento.

Según la Figura 56 un aspecto importante de resaltar en los datos obtenidos anteriormente tiene que ver con la disminución en un 3.3% del índice de plasticidad con respecto a las muestras que se dosificaron con cal. En el caso de la estabilización con cemento se anuló completamente la plasticidad del suelo.

Humedad Óptima y Densidad Máxima

Se realizaron ensayos de Proctor modificado con el fin de determinar la humedad óptima de compactación de los diferentes suelos, y la densidad máxima que alcanzan los mismos, este ensayo se realizó siguiendo lo dictado por la norma ASTM D1557-ASTM D1883, a continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla N°20

Humedad Óptima y Densidad Máxima

	Material In-Situ (patron)	Suelo +2.5% cal	Suelo +3.0% cal	Suelo +7.0% cemento	Suelo +8.0% cemento
Humedad Óptima (%)	7.45	7.60	7.83	8.40	8.65
Densidad Máxima Seca (g/cm ³)	1.948	1.954	1.962	1.977	1.982

Fuente: Elaboración propia

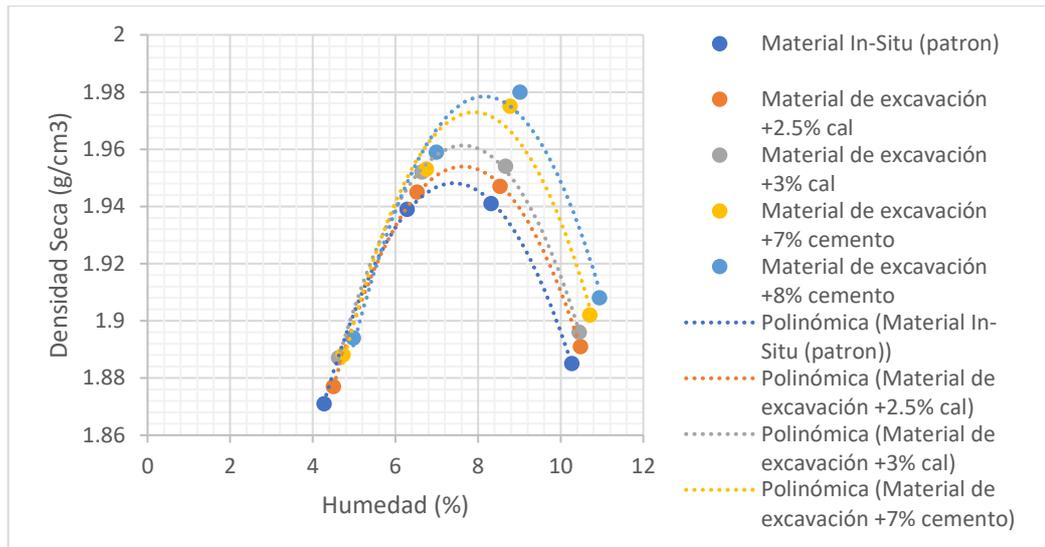


Figura 57. Curvas de Proctor modificado para cal y cemento
Fuente: Elaboración propia

Según (Montejo, 2002) “si se compacta una mezcla de suelo - cal se obtiene por lo general una densidad seca menor que el correspondiente al suelo, para las mismas condiciones de compactación. Esta disminución puede alcanzar hasta un 5%” pero sin embargo la densidad máxima seca de las combinaciones del suelo al 2.5%-3% de cal resultaron (1.954 – 1.962) g/cm³ respectivamente fueron ligeramente mayores a la densidad del patrón por lo cual no corrobora el concepto de Montejo. Por otro lado, no ocurre lo mismo con la capacidad resistente, por lo contrario, la agregación de la cal produce un aumento de la resistencia de los suelos reflejado en los resultados de CBR. Para el caso de las mezclas de suelo-cemento a medida que se aumenta el porcentaje de cemento aumenta su densidad máxima seca.

Capacidad de Soporte de California (CBR)

Con el objetivo de identificar el impacto de cada una de las metodologías de estabilización estudiadas sobre el suelo de excavación, tanto como material de terraplén como de subrasante para la estructura de pavimentos, se realizó un ensayo de CBR en laboratorio a todas las muestras, de acuerdo con lo estipulado en la norma INV-148, los resultados se presentan a continuación:

Tabla N°21

Resultados ensayos de CBR

	Material In-Situ (patron)	Material +2.5% cal	Material +3% cal	Material +7% cemento	Material +8% cemento
CBR (%) al 95%	5.7%	%10.5	%12.6	-	-

Fuente: Elaboración Propia

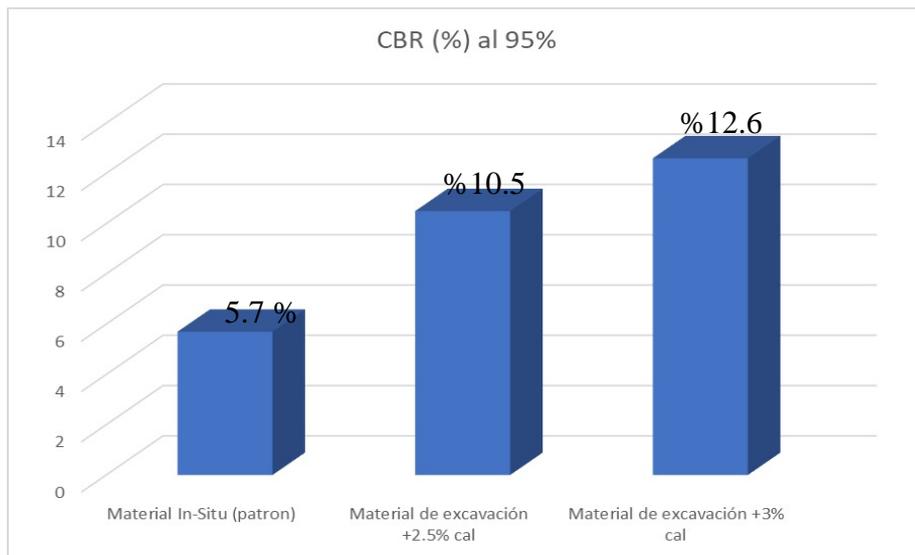


Figura 58. Resultados del CBR al 95% con 2.5%, 3% de cal
Fuente: Elaboración Propia

En Figura 58 se visualiza que el 2.5% y 3% de cal logran mejorar su CBR en un 10.5% y 12.6% respectivamente categorizando a la subrasante como “buena”.

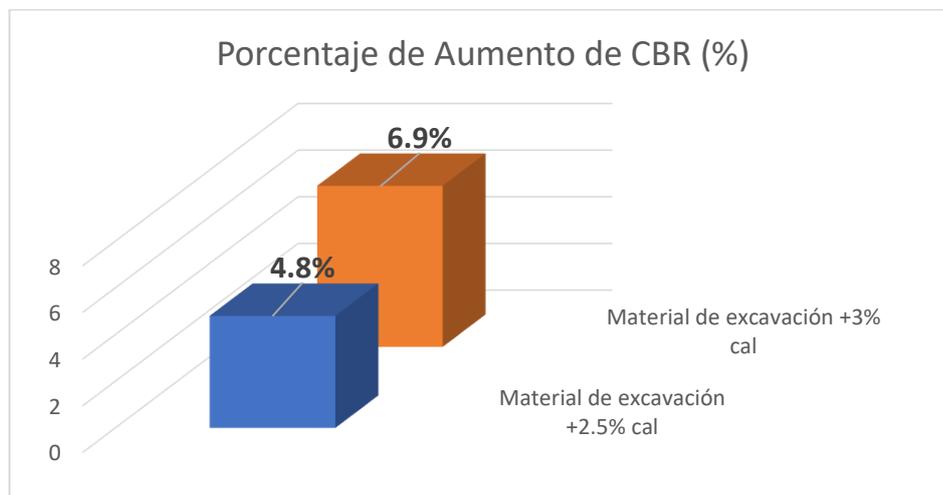


Figura 59. Porcentaje de aumento de CBR
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la Figura 59 los métodos evaluados, generan un aumento de la capacidad de soporte CBR del suelo, con un incremento de 4.8 % y 6.9 % con la cal al 2.5% y 3% respectivamente Por otro lado al estabilizar con cemento el ensayo de CBR no se pudo culminar para una dosificación del 7% y 8% respectivamente, en vista que el pistón no pudo penetrar en la muestra.

Resistencia a la compresión no confinadas

Tabla N°22

Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento MTC 1103

Muestra	Edad	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área mm ²	Carga máxima KN	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Resistencia a la compresión Prom Kg/cm ²
M1-7%	7	101	116	8012	12	14.7	14.2
M1-7%	7	101	116	7854	11	13.7	

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla N°22 se muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión no confinada para los dos testigos al 7% de cemento. Alcanzando una resistencia a la compresión promedio de 14.2 kg/cm² equivalente a 1.39Mpa, según el MTC E 1103 se debe garantizar una resistencia mínima de 1.8Mpa por lo cual la estabilización del suelo estabilizado al 7% no se podrá implementar para una estructura del pavimento rígido. Sin embargo, según la norma del Cuerpo de Ingenieros (COE) se establece una resistencia mínima a los siete días de 200 Psi para un pavimento rígido. La resistencia a la compresión promedio es de 14.2 kg/cm² equivalente a 201.97 Psi, por ende, el 7% de suelo cemento solo se podría utilizar para estabilizar un pavimento rígido a nivel de subbase o subrasante. (Ver Tabla N°15)

Tabla N°23

Resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento MTC 1103

Muestra	Edad	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Área mm ²	Carga máxima KN	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Resistencia a la compresión Prom Kg/cm ²
M1-8%	7	101	116	8091	14	17.1	18
M1-8%	7	101	116	8155	15	19.0	

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla N°23 se muestra los resultados del ensayo de resistencia a la compresión no confinada para los dos moldes al 8% de cemento alcanzando una resistencia a la compresión promedio de 18 kg/cm² equivalente a 1.8Mpa. Por lo tanto, según el MTC E 1103 cumple. La compresión promedio de 18 kg/cm² equivalente a 261.07 Psi, según la norma del Cuerpo de Ingenieros (COE), se puede emplear el porcentaje del 8% de cemento para estabilizar un pavimento rígido o flexible a nivel de subrasante o subbase.

5.5. Contratación de Hipótesis

5.5.1 Hipótesis específica 1

H1-1: Determinando las propiedades físicas de los suelos colapsables se seleccionan los tipos de estabilizadores en pavimentos industriales en la zona de Paita, Piura.

H1-0: Determinando las propiedades físicas de los suelos colapsables no se seleccionan los tipos de estabilizadores en pavimentos industriales en la zona de Paita, Piura.

De las muestras de suelos en estudio se expondrá las propiedades físicas y composición química de la calicata más representativa “C-3” cuya clasificación de grupo correspondió según AASHTO “A-2-6” y según SUCS “SP-SC”, presentaron un índice de plasticidad media de 13.08%, un límite líquido de 29.08%, se obtuvo una densidad seca in situ 1.43g/cm³, contenido de humedad natural de 8%; Según la Tabla N°9 el estrato de suelo en estudio contiene concentraciones perjudiciales de sales solubles totales, moderado de carbonatos y sulfatos. En base a estas propiedades físicas se determinó según la norma técnica E-050 suelos y cimentaciones (Ver Figura N°40) que el suelo

es colapsable por lo tanto se realizó el método de ensayo normalizado para la medición del potencial de colapso de suelos (NTP 339.163) hallando el valor de índice de colapso de 1.46% al ser menor del 6% no es obligatorio su remplazo según la norma E-050. Sin embargo, se encontró carbonatos a grandes profundidades por lo que no es recomendable su sustitución por lo tanto se ha descartado una posible estabilización mecánica.

Cañi (2020) Estudiaron prevenir un evento catastrófico en las edificaciones a consecuencia de los problemas de suelos especiales. Mediante la caracterización del suelo, ensayos de laboratorio para la determinación de sus propiedades físicas, mecánicas, químicas y la medición del potencial de colapso de suelo. Se represento como una arena limosa (SM), una densidad baja de 1.344gr/cm³, índice de plasticidad de 3% (suelos de baja plasticidad), valores de índice de colapso a una carga de 0.50 kg/cm² (I_c) es de 2.9 – 3.9 % y el índice de colapso a una carga de 1.00 kg/cm² (I_c) es de 3.5 – 5.2%. Suelo de colapso MODERADO, permitiendo apoyar las cimentaciones en este tipo de suelo.

Caceda (2017) realizaron un reconocimiento y evaluación del suelo en el asentamiento Humano Magdalena Nueva – Chimbote, ya que estas viviendas están asentadas en zonas de material de relleno no calificado. Se describió como un tipo de suelo SP (arena mal graduada con pocos finos), índice de plasticidad de 6.44%. Se ensayo estabilizaciones con 10% de cemento mejorando la capacidad portante del suelo.

En conclusión, el mejor aditivo solo puede determinarse mediante estudios de las propiedades de ingeniería de los suelos colapsables. Existen materiales de suelo cuyas propiedades físicas requieren ser mejoradas con proporciones de cemento o cal para la reducción del Índice de Plasticidad (IP) y el aumento de la resistencia. El éxito de la estabilización con aditivo depende en gran medida de conseguir una distribución completa y uniforme del aditivo en el suelo.

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H1-1) y se rechaza la hipótesis nula (H1-0).

5.5.2 Hipótesis específica 2

H2-1: Los estabilizadores seleccionados mejoran las propiedades físicas-Mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita - Piura.

H2-0: Los estabilizadores seleccionados no mejoran las propiedades físicas-Mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita - Piura.

La selección de la cal y el cemento se debe a la gran experiencia en su uso, accesibilidad y bajo costo en comparación con otras alternativas. Las estabilizaciones con 7% y 8% de cemento mejoraron las propiedades físicas-mecánicas del suelo colapsable obteniendo una disminución hasta la nulidad del índice de plasticidad (IP) y un incremento del CBR en 10.5% al 7% de cal y 12.6% al 8% de cal, resultando una subrasante buena. A comparación con las estabilizaciones con 2.5% y 3% de cal se logró reducir el IP en un 8% y 7% respectivamente y se obtuvo valores de CBR en 100% para los dos porcentajes de cemento ya que no se pudo completar el ensayo de CBR, porque el pistón no penetra en la muestra en consecuencia se realizó ensayo de compresión no confinada, siendo también una subrasante adecuada.

Bahmyari, Ajdari, & Vakili (2021) En su estudio experimental examinaron los efectos de los estabilizadores en un suelo colapsable, en el cual la cal y el cemento mostraron un mejor rendimiento en la reducción del potencial de colapso.

Quijano y Tenjo (2018) Revisaron en primera instancia las características y propiedades del suelo en la construcción de la vía del tramo II de la Transversal el Bosque, con el fin de descubrir las causas de los múltiples hundimientos presentados en la vía. Se definió el suelo como una arena fina limosa, índice de plasticidad del 8%, se revisó un valor de índice de colapso de 6.05%. Se planteó una estabilización mecánica del material con 85% (afirmado) – 15% (suelo natural), también se ensayó estabilizaciones con 5% y 7% de cal mejorando la capacidad de soporte del suelo.

En conclusión, mediante el tratamiento del 3% de cal y 8% de cemento se logra una reducción de su plasticidad y un aumento de su capacidad de soporte por lo tanto se logra mejorar sus características resistentes, sus

propiedades geotécnicas y con ello su durabilidad y sus prestaciones durante su vida útil.

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H2-1) y se rechaza la hipótesis nula (H2-0).

5.5.3 Hipótesis específica 3

H3-1: El 7% y 8% de cemento incide favorablemente en las propiedades físicas- mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita.

H3-0: El 7% y 8% incide favorablemente en las propiedades físicas- mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita.

El suelo estabilizado con cemento al 7% presento valores de resistencia de 1.4Mpa, el cual no cumple con la resistencia mínima exigida por el MTC. Sin embargo, anulo el índice de plasticidad. Es decir, el cemento al reaccionar con las arcillas tiende a neutralizar o secar la muestra, convirtiéndolo menos deformable.

En cambio, el suelo estabilizado con 8% tuvo una resistencia a los 7 días de 1.8 Mpa cumpliendo con la resistencia mínima exigida por el MTC. Además, también anulo el índice de plasticidad. Por lo tanto, el contenido del 8% de cemento incide favorablemente en las propiedades físicas- mecánicas del suelo en estudio. Sin embargo, es necesario garantizar que el agua debida a las condiciones climáticas de la zona no va afectar la resistencia del pavimento por ello se requiere aumentar la impermeabilidad del material colocando una geomembrana.

Bahmyari, Ajdari, & Vakili (2021) En su estudio experimental la adición de cemento en un 5% y 7% para un tiempo de curado de 14 días los resultados indicaron que la adición del cemento al suelo redujo el grado de colapsabilidad de forma significativa y aumenta la resistencia al corte no drenado del suelo hasta 5 veces. Provocando la reducción de la plasticidad del suelo la hidratación del cemento absorbió una notable cantidad de agua tras un día de curado.

En conclusión, la estabilización química mediante el cemento al 8% supero a la cal incrementando la resistencia del suelo y disminuyendo su plasticidad,

transformándolo a un suelo fino en una masa rígida obteniendo una mejor resistencia y anulando la plasticidad

Por lo anteriormente expuesto, se acepta la hipótesis alternativa (H3-1) y se rechaza la hipótesis nula (H3-0).

5.5.4 Hipótesis general

Habiendo sido validadas las hipótesis alternativas (H11, H12 y H13), entonces se valida la hipótesis general: determinando el tipo de estabilizador se mejora las propiedades físicas - mecánicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita.

CONCLUSIONES

1. El suelo colapsable ubicado en la zona industrial del distrito de Paita – Piura presenta suelos colapsables de origen eólico, correspondiente a la clasificación SP-SC con índice de plasticidad mayores a 12 y menor a 30 (Ver Tabla N°16). Los estabilizadores con porcentaje de 3% de cal y 8% de cemento mejoran las propiedades físicas mecánicas del suelo colapsable logrando mejorar sus características resistentes y sus propiedades geotécnicas.
2. El estudio de las propiedades físicas y composición química del suelo colapsable es importante para la selección del tipo de estabilizador a utilizar. La zona en estudio presenta suelos colapsables que contienen sales y sulfatos conglomerados con agentes cementantes conocidos como carbonatos. En el estudio químico se evidenció la alta presencia de sales solubles en 1.55% que es un factor importante porque contribuye a que el suelo sea más susceptible al colapso, debido a que las sales cementan las partículas sólidas del suelo proporcionando una resistencia adicional al esfuerzo cortante del suelo que luego humedecido este pierde su resistencia y con ello ocasiona asentamientos diferenciales. Además, el moderado contenido de sulfatos en 0.13% sirvió para seleccionar el tipo de cemento a utilizar y tuvo reacciones químicas adecuadas con la cal. Por último, se identificó un moderado contenido de carbonatos en 48.21% (Ver Tabla N°9). Por lo tanto, el mejor aditivo solo puede determinarse mediante estudios de las propiedades de ingeniería de los suelos colapsables.
3. Mediante el tratamiento del 3% de cal se logra una reducción de la plasticidad en 3.30% (Ver tabla N°19) y un aumento de su capacidad de soporte en un 6.9% (Ver Tabla N°21). Para el 8% de cemento se alcanza una resistencia inicial a los 7 días de curado de 1.8 Mpa cumpliendo con la resistencia mínima establecida por el MTC, además se logró anular la plasticidad del suelo. Por lo tanto, el suelo en estudio mejora sus características resistentes, sus propiedades geotécnicas y con ello su durabilidad y sus prestaciones durante su vida útil.
4. La estabilización química mediante el cemento al 8% supero a la cal. Resulta evidente que los procedimientos que sirvan para mantener a un suelo sin que se produzcan cambios volumétricos, son también adecuados para mantener la resistencia en el suelo, el cemento transformo a un suelo fino en una masa rígida obteniendo una mejor resistencia y anulando la plasticidad.

RECOMENDACIONES

1. Continuar investigando la estabilización con cemento y cal, particularmente desde el punto de vista de costos y presupuestos.
2. Se deben realizar ensayos de laboratorio por tipo de suelo a estabilizar, a fin de determinar el perfil y varias propiedades del material, incluido el contenido de humedad, las características de plasticidad y la capacidad de carga; puesto que, cada muestra de suelo posee una condición física, química y mecánica específica también se recomienda caracterizar correctamente el suelo para decidir el contenido de cemento apropiado que se debe añadir.
3. Al estabilizar un suelo colapsable es necesario tener en consideración las condiciones meteorológicas de la zona de estudio. La zona industrial de Paita – alta está expuesta a condiciones de humedad significantes debido al Fenómeno del niño, su cercanía al mar y al ser una zona de pendiente llana esta propensa a acumulaciones de agua (cuencas ciegas). Todo ello puede conllevar a que el suelo sea más susceptible al colapsar.
4. Para identificar un suelo colapsable es necesario estudiar sus propiedades físicas y composición química para evaluar la susceptibilidad del suelo al colapso, la zona industrial del distrito de Paita-Piura presentan suelos colapsables de origen eólicos. moderado contenido de carbonatos y sulfatos; y alta cantidades de sales conllevan a que el suelo sea más propenso a colapsar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Army, U. (1984). *Engineer Manual No. 1110-3-137*. Washington, D.C.: Department of the army u.s. Army Corps of Engineers.
- Bahmyari, H., Ajdari, M., & Vakili, A. (2021). *The Role of the Cement, Lime, and Natural Pozzolan Stabilizations on the Mechanical Response of a Collapsible Soil*. Fasa, Iran: Transportation Infrastructure Geotechnology.
- Becker, E. (2018). *Pisos industriales de hormigón*. Buenos Aires.
- Bernal, I., & Gómez, J. (2019). *Programa presupuestal n° 068: reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres*. Lima, Peru: Instituto Geofísico del Perú.
- Briones, M., & Irigoien, N. (2015). *Zonificación mediante el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) y la capacidad portante del suelo, para viviendas unifamiliares en la expansión urbana del anexo lucmachuco alto*. (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca.
- CENEPRED. (2017). *Informe de evaluación del riesgo por inundación pluvial en el centro poblado de Paita, distrito de Paita, provincia de Paita, departamento de Piura*. Paita: SIGRID.
- Flores, A. (2018). *Determinación del tipo de suelo y potencial de colapso del suelo del puesto de salud intiorko distrito de ciudad nueva, departamento de tacnca-2017*.
- Knodel, P. C. (1992). *"Characteristics and Problems of Collapsible Soils"*. Colorado: Denver CO 80225.
- Mendez, G. (2020). *Influencia de la dosificación de fibras de polietileno tereftalo, sobre el índice del CBR y compresión simple de un suelo arcilloso aplicado a subrasantes*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Colombia: Agora Editores.
- MTC. (2004). *MTC e 1109 –2004 norma técnica de estabilizadores químicos*. Lima: Primera Edición.
- MTC. (2008). *Manual de Diseño de Carreteras no Pavimentadas de Bajo Volumen de Transito*. Lima.
- MTC. (2014). *R.D. n° 10-2014-mtc/14 manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima: Biblioteca Nacional del Perú.

- Ortiz, S., Carrillo, R., & Gómez, J. C. (2021). *Características Geodinámicas en el Distrito de Paita*. Lima, Perú: IGP.
- Palomares, J., & Mojica, V. (2021). *Implementación de geosintéticos en la ingeniería de pavimentos como solución de mejoramiento para la subrasante de pavimentos flexibles*. (Trabajo de Grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C.
- Portaluppi, L. (2014). *Información de geomembranas PVC y HDP*. Obtenido de erp.iestbellavista.edu.pe:8080/criarpeces.com.ar/wp-content/uploads/2014/03/Informaci%C3%B3n-de-las-geomembranas.pdf.
- Quijano, D., & Tenjo, E. (2018). Análisis de efectividad en la estabilización de suelos colapsables en el tramo II de la transversal el bosque en el municipio de Floridablanca, Santander. (Tesis de pregrado). Universidad distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Ramirez, B. (2018). *Evaluación del comportamiento del CBR e impermeabilidad de un suelo oareno-arcilloso usando el estabilizador químico sistema consolid*. (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Ramirez, E. (2021). *Métodos para Identificar Suelos Colapsables*. (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás, Bogotá.
- Redolfi, E. (2007). *Suelos colapsables. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Departamento de Construcciones Civiles, Bogotá*.
- Rodríguez, O., Salgado, E., Gallo, A., & Vanegas, E. (2013). *Revisión teórica de evaluación de Potencial de Colapso en las dunitas de Medellín*. Medellín: Ingeniería Solidaria Vol 10 n° 17.
- Rollins, K., & Rogers, W. (1994). *Mitigation measures for small structures on collapsible alluvial soils*. Journal of Geotechnical Engineering.
- Romero, R., & Sañac, C. (2016). *Evaluación comparativa mediante la capacidad de soporte y densidad máxima de un suelo adicionado con polímero adhesivo natural en porcentajes de 0.5%, 1%, 2% y 3% frente a un suelo natural para subrasante de pavimento rígido*. (tesis de pregrado). Universidad Andina Cusco, Cusco.
- Shakir, M., & Jamal, M. (2021). *A Review of Collapsible Soils Behavior and Prediction*. Iraq: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Zornberg, J. (2019). *Funciones y Aplicaciones de Geosintéticos en Carreteras*. Texas: Universidad de Texas de Austin.

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL:	OBJETIVO GENERAL:	HIPÓTESIS GENERAL	V.I: ESTABILIZADORES DE SUELOS	CAL	Dosificación	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN: Método: Deductivo Orientación: Aplicada Enfoque: Cuantitativo Fuente de Recolección de Datos: Prolectiva TIPO DE INVESTIGACIÓN Descriptivo Correlacional NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Descriptivo - Explicativo DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Experimental – longitudinal - prospectivo POBLACIÓN Suelos colapsables MUESTRA: Ensayos realizados durante la estabilización INSTRUMENTOS: Estudio de Mecanica de Suelos
¿Cuáles son los tipos de estabilizadores para mejorar las propiedades físicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?	Determinar los tipos de estabilizadores para mejorar las propiedades físicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.	Determinando el tipo de estabilizador se mejora las propiedades físicas del suelo colapsable en pavimentos industriales en la zona de Paita.			Límites de Atterberg	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS			Indicador de Relación de Soporte de California (CBR)	
1. ¿Cómo seleccionamos los tipos de estabilizadores según las propiedades físicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?	1. Identificar las propiedades físicas-químicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.	1. Determinando las propiedades físicas-químicas de los suelos colapsables se seleccionan los tipos de estabilizadores en pavimentos industriales en la zona de Paita, Piura.			Dosificación	
2. ¿Cuáles son los estabilizadores que mejoran las propiedades físicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?	2. Proponer los estabilizadores que mejoran las propiedades físicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.	2. Los estabilizadores seleccionados mejoran las propiedades físicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita.	V.D: SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	CEMENTO	Límites de Anterberg	
3. ¿De qué modo incide el cemento como estabilizador seleccionado en las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura?	3. Determinar la incidencia del cemento como estabilizador seleccionado en las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita Alta, Piura.	3. El 8% de cemento como estabilizador incide favorablemente en las propiedades físicas-mecánicas de los suelos colapsables en pavimentos industriales en la zona de Paita.			Resistencia a la compresión no confinada (Mpa)	
					Peso volumétrico Seco	
				Criterios de identificación de suelos colapsables e índice de colapso	Límites de Atterberg	
					Ensayo de colapsabilidad	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Matriz de Operacionalización

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INDICES	INSTRUMENTO	HERRAMIENTA	
VARIABLE DEPENDIENTE: SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	Los suelos colapsables, que en ocasiones se denominan suelos colapsables o suelos metaestables, son suelos no saturados que experimentan un gran cambio de volumen al saturarse. El cambio puede o no ser el resultado de la aplicación de una carga adicional. Pag (686). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones Braja M. Das Séptima edición (1983).	En los lugares donde se conozca o sea evidente la ocurrencia de hundimientos debido a la existencia de suelos colapsables, el PR deberá incluir en su EMS un análisis basado en la determinación de la plasticidad del suelo NTP 339.129 (ASTM D4318), del ensayo para determinar el peso volumétrico NTP 339.139 (BS 1377), y del ensayo de humedad NTP 339.127 (ASTM D2216), con la finalidad de evaluar el potencial de colapso del suelo en función del Límite Líquido (LL) y del peso volumétrico seco (γ_d). Norma E050 Pag.42	Criterios de identificación de suelos colapsables e índice de colapso	Peso volumétrico Seco	Masa Seca , Volumen total	EMS	NTP 339.139 (BS 1377)	
				Limites de Anterberg	Límite Líquido	EMS	NTP 339.129 (ASTM D4318) 1377)	
				Ensayo de colapsabilidad	Relación de vacíos, Gravedad específica y Densidad In Situ	Consolidometro	NTP 339.163 2001	
VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INDICES	INSTRUMENTO	HERRAMIENTA	
VARIABLE INDEPENDIENTE: ESTABILIZADORES DE SUELOS	Mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos MTC (2014). La estabilización de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto, genéricamente denominado estabilizador, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a las especificaciones técnicas del producto (MTC, 2005, p.4).	El uso de la cal en la estabilización de suelos sigue el propósito general de esta clase de trabajos, es decir, mejorar las características naturales del suelo de modo que aumente su capacidad para resistir los efectos inducidos por el tránsito (esfuerzo de corte) y los cambios volumétricos en diferentes condiciones de clima. (Montejo, 2002, p.100).	CAL	Dosificación	2.5% - 3%	Ensayos de laboratorio	ASTM D1577 - ASTM D1883 - ASTM D4318	
				Limites de Anterberg	Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad			
				Indicador de Relación de Soporte de California (CBR)	$20\% \geq \text{CBR} \geq 10\%$			
		CEMENTO	Tiene influencia principalmente por su composición química y su granulometría. Los suelos que pueden ser tratados con cemento con fines viales para obtener una estabilización económica se obtiene cuando el suelo no contiene partículas mayores de 7.5 cm o de un tercio del espesor de la capa tratada, menos del 50% de él pasa el tamiz de 0.074 mm, el Límite líquido es inferior a 40 y el índice plástico menor a 18. (Montejo, 2002, p.113).		Dosificación	7% - 8%	Ensayos de laboratorio	MTC 1103 - ASTM D1577 - ASTM D1883 - ASTM D4318
					Limites de Anterberg	Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad		
					Resistencia a la Compresión no Confinada (Mpa)	$f'c \geq 1.8\text{Mpa}$		

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3: Resultados de ensayos de laboratorio



RUC 20506076235
 Dirección: Av. Circunvalación Mz. "B", Lote 1,
 Int. 1 Huachipa - Lima - Perú
 950 270 955 - 01 5407661
 Web: www.masterlem.com.pe
 Email: servicios@masterlem.com.pe

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_1
 Nombre del proyecto : Bach. Blas Soto Brayand Lincoln Fecha de ensayo : 22/09/2022
 : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de emisión : 27/09/2022
 Ubicación del proyecto : Paiza, Plura.

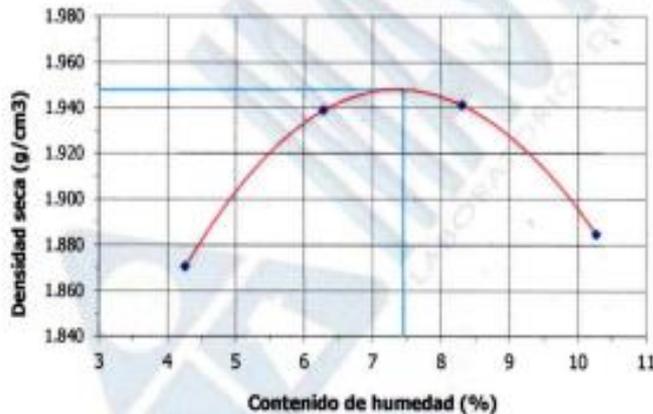
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO PARA CBR ASTM D1557 / ASTM D1883

REFERENCIAS DE LA MUESTRA:

Identificación : M-01 Presentación : Saco de polipropileno
 Cantidad : 60 kg aprox.

N° de capas:	5	Altura de caída de pison:	45.72 cm	w del pison:	4.53 kg	Volumen del molde:	937.90
Energía de compactación modificado:	2700 kN-m/m ²		Número de golpes/capas:		25 golpes		
Peso suelo húmedo + molde	(g)	3653.2	3756.7	3795.7	3773.1		
Peso del molde	(g)	1823.9	1823.9	1823.9	1823.9		
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1829.3	1932.8	1971.8	1949.2		
Volumen del molde	(cm ³)	937.9	937.9	937.9	937.9		
Densidad Húmeda	(g/cm ³)	1.950	2.061	2.102	2.078		

Recipiente N°		A	B	C	D
Peso suelo húmedo + recipiente	(g)	866.6	897.1	916.6	917.7
Peso suelo seco + recipiente	(g)	848.0	868.5	877.7	870.5
Peso del recipiente	(g)	411.9	413.4	409.5	410.7
Peso del agua	(g)	18.6	28.6	38.9	47.2
Peso suelo seco	(g)	436.1	455.1	468.2	459.8
Contenido de Humedad	(%)	4.27	6.28	8.31	10.27
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.871	1.939	1.941	1.885



PREPARACION DE LA MUESTRA

Tamiz	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
3/4"	0.0	100
3/8"	0.0	100
N° 4	1.8	98.2
METÓDO		"A"

MDS	1.948 g/cm ³
OCH	7.45 %

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.
 La muestra fue proporcionado por el cliente.



[Signature]
 JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
 INGENIERO CIVIL
 Reg. de CIP N° 84286

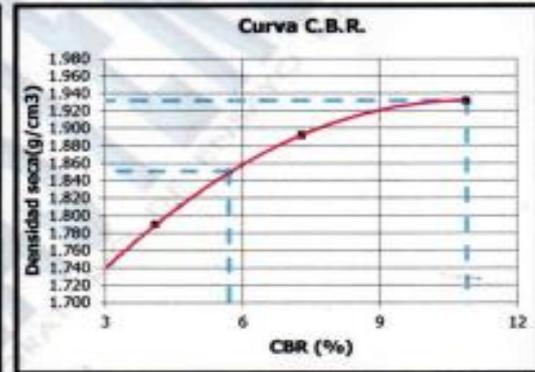
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_2
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln Fecha de Ensayo : 26/09/2022
Nombre de Proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de Emisión : 27/09/2022
Ubicación de Proyecto : Paña, Piura.
Identificación de muestra : M-01

MÉTODO DE ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (C.B.R.) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO ASTM D 1883

Muestra (Golpes)	Densidad Seca (g/cm ³)	Penetración (")	C.B.R. (%)	Expansión (%)
56	1.932	0.1	10.9	0.62
25	1.892	0.1	7.3	0.68
10	1.789	0.1	4.1	0.72

C.B.R. al 100 % de la Máxima Densidad Seca (%)	10.9
C.B.R. al 95 % de la Máxima Densidad Seca (%)	5.7

Máxima Densidad Seca Próctor (g/cm ³)	1.948
Óptimo Contenido de Humedad Próctor (%)	7.5



Observaciones:

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.



[Firma manuscrita]

JOSÉ FRANCISCO RAMÍREZ JAPUA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

Solicitante : Bach. Arce Figueras Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_3
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales Fecha de ensayo : 23/09/2022
en pavimentos industriales". Fecha de emisión : 29/09/2022
Ubicación del proyecto : Paíta, Piura.

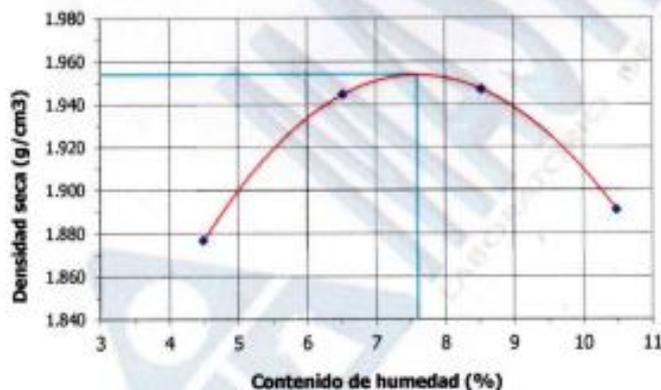
ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO PARA CBR ASTM D1557 / ASTM D1883

REFERENCIAS DE LA MUESTRA:

Identificación : M-01 + 2.5% de cal Presentación : Saco de polipropileno
Cantidad : 60 kg aprox.

Nº de capas:	5	Altura de caída de pison:	45.72 cm	w del pison:	4.53 kg	Volumen del molde:	937.90
Energía de compactación modificado:		2700 kN·m/m ³		Numero de golpes/capas:		25 golpes	
Peso suelo húmedo + molde	(g)	3663.2	3766.7	3805.7	3783.1		
Peso del molde	(g)	1823.9	1823.9	1823.9	1823.9		
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1839.3	1942.8	1981.8	1959.2		
Volumen del molde	(cm ³)	937.9	937.9	937.9	937.9		
Densidad Húmeda	(g/cm ³)	1.961	2.071	2.113	2.089		

Recipiente N°		N11	N12	N13	N14
Peso suelo húmedo + recipiente	(g)	876.8	887.1	926.3	927.4
Peso suelo seco + recipiente	(g)	856.6	858.1	885.7	878.4
Peso del recipiente	(g)	411.9	413.4	406.5	410.7
Peso del agua	(g)	20.0	29.0	40.6	49.0
Peso suelo seco	(g)	444.7	444.7	476.2	467.7
Contenido de Humedad	(%)	4.50	6.52	8.53	10.48
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.877	1.945	1.947	1.891



Tamiz	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
3/4"	0.0	100
3/8"	0.0	100
Nº 4	1.8	98.2
METÓDO		"A"

MDS	1.954 g/cm ³
OCH	7.60 %

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados. La muestra fue proporcionado por el cliente.



JFR
JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286



Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre de Proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
Ubicación de Proyecto : Paíta, Piura.
Identificación de muestra : M-01 + 2.5% de cal

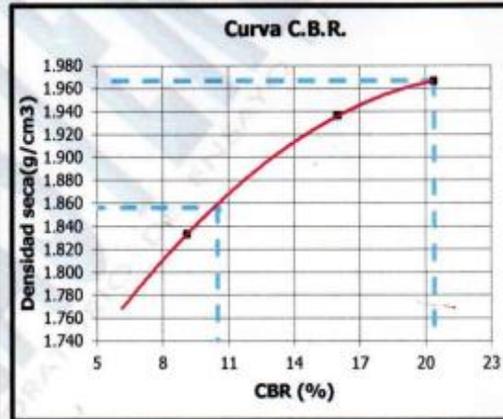
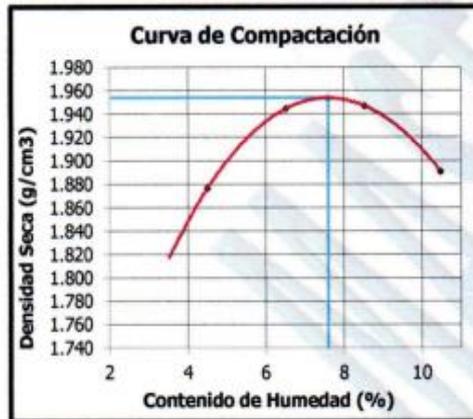
Expediente N° : 224_22_4
Fecha de Ensayo : 26/09/2022
Fecha de Emisión : 29/09/2022

MÉTODO DE ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (C.B.R.) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO ASTM D 1883

Muestra (Golpes)	Densidad Seca (g/cm ³)	Penetración (")	C.B.R. (%)	Expansión (%)
56	1.967	0.1	20.4	0.31
25	1.936	0.1	16.0	0.43
10	1.833	0.1	9.1	0.46

C.B.R. al 100 % de la Máxima Densidad Seca (%)	20.4
C.B.R. al 95 % de la Máxima Densidad Seca (%)	10.5

Máxima Densidad Seca Próctor (g/cm ³)	1.954
Óptimo Contenido de Humedad Próctor (%)	7.6



Observaciones:

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286



MASTERLEM S.A.C.
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

RUC 20506076235
Dirección: Av. Circunvalación Mz. "B", Lote 1,
Int. 1 Huachipa – Lima – Perú
950 270 955 – 01 5407661
Web: www.masterlem.com.pe
Email: servicios@masterlem.com.pe

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_5
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de ensayo : 23/09/2022
Ubicación del proyecto : Paita, Piura. Fecha de emisión : 27/09/2022

ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO PARA CBR ASTM D1557 / ASTM D1883

REFERENCIAS DE LA MUESTRA:

Identificación : M-01 incorporando 7% de cemento Presentación : Saco de polipropileno
Cantidad : 60 kg aprox.

N° de capas:	5	Altura de caída de pison:	45.72 cm	w del pison:	4.53 kg	Volumen del molde:	937.90
Energía de compactación modificada:		2700 kN-m/m ³		Número de golpes/capas:		25 golpes	
Peso suelo húmedo + molde	(g)	3678.2	3779.7	3838.7	3799.1		
Peso del molde	(g)	1823.9	1823.9	1823.9	1823.9		
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1854.3	1955.8	2014.8	1975.2		
Volumen del molde	(cm ³)	937.9	937.9	937.9	937.9		
Densidad Húmeda	(g/cm ³)	1.977	2.085	2.148	2.106		

Recipiente N°	F	G	H	M
Peso suelo húmedo + recipiente	(g) 867.6	897.1	916.6	918.7
Peso suelo seco + recipiente	(g) 847.0	866.5	875.7	869.6
Peso del recipiente	(g) 411.9	413.4	409.5	410.7
Peso del agua	(g) 20.6	30.6	40.9	49.1
Peso suelo seco	(g) 435.1	453.1	466.2	458.9
Contenido de Humedad	(%) 4.73	6.75	8.77	10.70
Densidad Seca	(g/cm ³) 1.888	1.953	1.975	1.902



PREPARACION DE LA MUESTRA

Tamiz	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
3/4"	0.0	100
3/8"	0.0	100
N° 4	1.8	98.2
METÓDO		"A"

MDS	1.977 g/cm ³
OCH	8.40 %

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.

La muestra fue proporcionado por el cliente.

Nota

No se puede realizar el C.B.R. porque el piston no penetra en la muestra



[Signature]
JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAJAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
 Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
 Expediente N° : 224_22_6
 Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
 Fecha de ensayo : 27/09/2022
 Ubicación del proyecto : Paíta, Piura.
 Fecha de emisión : 29/09/2022
 Identificación muestra : M- 01

ENSAYO QUÍMICOS CONTROL DE CALIDAD SUELOS

Ensayos	Unidades	Resultados	Norma
Contenido de sulfatos	ppm	1317	NTP 339.178 -2015
	%	0.13	

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.




 JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAIA
 INGENIERO CIVIL
 Reg. de CIP N° 84286

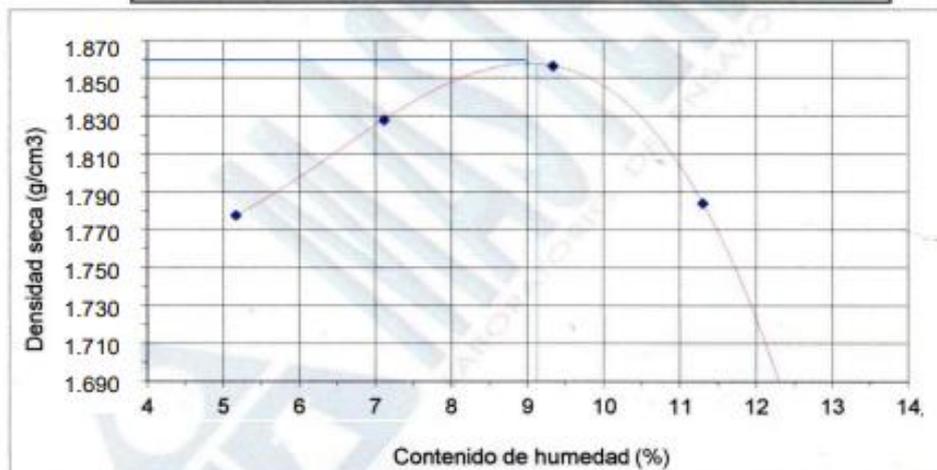
Solicitante	: Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Bach. Blas Soto Brayand Lincoln	Expediente N°	: 224_22_7
Nombre de Proyecto	: "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".	Fecha de Ensayo	: 23/09/2022
Ubicación de Proyecto	: Paita, Piura.	Fecha de Emisión	: 29/09/2022
Identificación de muestra	: M-01 + 7 % de cemento		

MÉTODO DE ENSAYO PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO PROCTOR ESTÁNDAR RELACION HUMEDAD -DENSIDAD SUELO CEMENTO MTC E 1102

Referencia de la muestra:

Material: M-01 + 7 % Cemento
Cemento: Cemento Portland Antisulfito Ms 42.5 kg Pacasmayo
Compactación: Manual
Método de compactación: "A"

MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.868	g/cm ³
ÓPTIMO CONT. DE HUMEDAD	9.1	%



Observaciones:

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAIA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
Ubicación del proyecto : Paita, Piura.
Identificación muestra : M-01 + 7% de cemento

Expediente N° : 224_22_8
Fecha de ensayo : 30/09/2022
Fecha de emisión : 30/09/2022

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO MTC 1103

Identificación	Edad (días)	Diametro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Area mm ²	Carga máxima kN	Resistencia a la compresión MPa	Resistencia a la compresión kg/cm ²	Resistencia a la compresión promedio kg/cm ²
M-01 + 7% de cemento	7	101	116	8012	12	1.4	14.7	14
M-01 + 7% de cemento	7	100	116	7854	11	1.3	13.7	

Nota:

Factor de conversión: 1 Mpa = 10.1972 kg/cm²
Fecha de elaboración 23/09/2022
Fecha de rotura 30/09/2022
Promedio de humedad de las muestras= 9.25%
Al final del periodo húmedo de curado, se sumergió en agua 4 horas antes del ensayo

Certificados de calibración de equipos

Certificado de calibración pie de rey N° CPR- 003-2021
Certificado de calibración celda de carga tipo S CAC-005-2022

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad
El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.
La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el cliente.




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

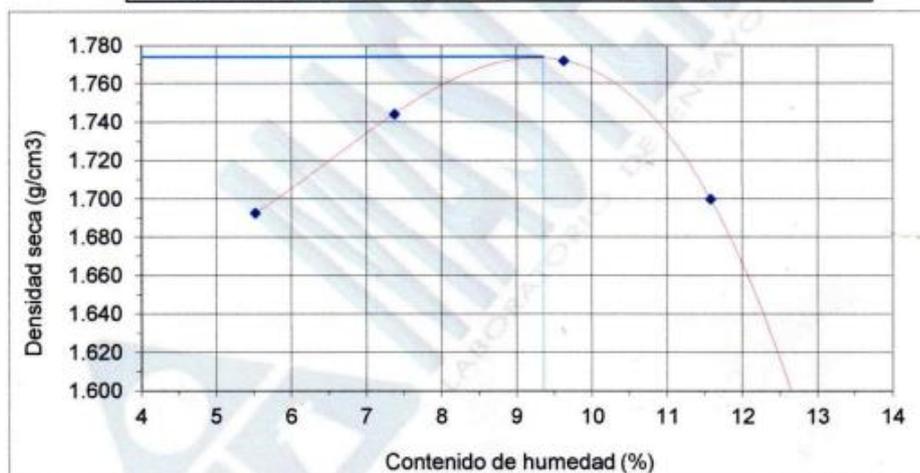
Solicitante	: Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Bach. Blas Soto Brayand Lincoln	Expediente N°	: 224_22_9
Nombre de Proyecto	: "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".	Fecha de Ensayo	: 23/09/2022
Ubicación de Proyecto	: Paita, Piura.	Fecha de Emisión	: 29/09/2022
Identificación de muestra	: M-01 + 8% de cemento		

MÉTODO DE ENSAYO PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO PROCTOR ESTÁNDAR RELACION HUMEDAD -DENSIDAD SUELO CEMENTO MTC E 1102

Referencia de la muestra:

Material: M-01 + 8 % Cemento
Cemento: Cemento Portland Antisalitre Ms 42.5 kg Pacasmayo
Compactación: Manual
Método de compactación: "A"

MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.774	g/cm³
ÓPTIMO CONT. DE HUMEDAD	9.4	%



Observaciones:

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.



[Signature]
JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
Ubicación del proyecto : Paita, Piura.
Identificación muestra : M-01 + 7% de cemento

Expediente N° : 224_22_8
Fecha de ensayo : 30/09/2022
Fecha de emisión : 30/09/2022

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO MTC 1103

Identificación	Edad (días)	Diametro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Area mm ²	Carga máxima kN	Resistencia a la compresión MPa	Resistencia a la compresión kg/cm ²	Resistencia a la compresión promedio kg/cm ²
M-01 + 7% de cemento	7	101	116	8012	12	1.4	14.7	14
M-01 + 7% de cemento	7	100	116	7854	11	1.3	13.7	

Nota:

Factor de conversión: 1 Mpa = 10.1972 kg/cm²
Fecha de elaboración : 23/09/2022
Fecha de rotura : 30/09/2022
Promedio de humedad de las muestras = 9.25%
Al final del periodo húmedo de curado, se sumergió en agua 4 horas antes del ensayo

Certificados de calibración de equipos

Certificado de calibración pie de rey N° CPR- 003-2021
Certificado de calibración celda de carga tipo S CAC-005-2022

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad
El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.
La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el cliente.




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286



MASTERLEM SAC
LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

RUC 20506076235
Dirección: Av. Circunvalación Mz. "B", Lote 1,
Int. 1 Huachipa – Lima – Perú
950 270 955 – 01 5407661
Web: www.masterlem.com.pe
Email: servicios@masterlem.com.pe

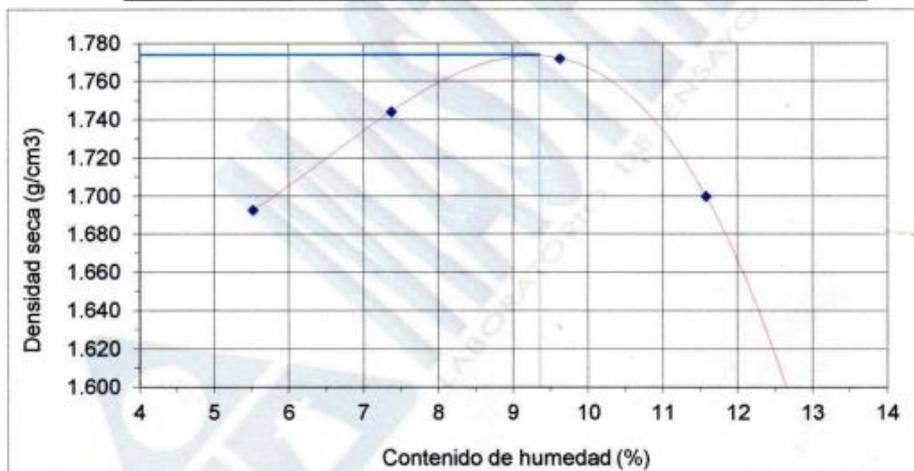
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_9
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre de Proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de Ensayo : 23/09/2022
Ubicación de Proyecto : Paíta, Piura. Fecha de Emisión : 29/09/2022
Identificación de muestra : M-01 + 8% de cemento

MÉTODO DE ENSAYO PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO PROCTOR ESTÁNDAR RELACION HUMEDAD -DENSIDAD SUELO CEMENTO MTC E 1102

Referencia de la muestra:

Material: M-01 + 8 % Cemento
Cemento: Cemento Portland Antisulfito Ms 42.5 kg Pacasmayo
Compactación: Manual
Método de compactación: "A"

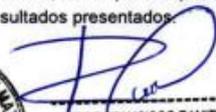
MÁXIMA DENSIDAD SECA	1.774	g/cm ³
ÓPTIMO CONT. DE HUMEDAD	9.4	%



Observaciones:

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
Ubicación del proyecto: Paita, Piura.
Identificación muestra: M-01 + 8% de cemento

Expediente N° : 224_22_10
Fecha de ensayo : 30/09/2022
Fecha de emisión : 30/09/2022

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS DE SUELO-CEMENTO MTC 1103

Identificación	Edad (días)	Diametro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Area mm ²	Carga máxima kN	Resistencia a la compresión MPa	Resistencia a la compresión kg/cm ²	Resistencia a la compresión corregida kg/cm ²
M-01 + 8% de cemento	7	102	205	8091	14	1.7	17.1	18
M-01 + 8% de cemento	7	102	205	8155	15	1.9	19.0	

Nota:

Factor de conversión: 1 Mpa = 10.1972 kg/cm²
Fecha de elaboración 23/09/2022
Fecha de rotura 30/09/2022
Promedio de humedad de las muestras= 9.26%
Al final del periodo húmedo de curado, se sumergió en agua 4 horas antes del ensayo

Certificados de calibración de equipos

Certificado de calibración pie de rey N° CPR- 003-2021
Certificado de calibración celda de carga tipo S CAC-005-2022

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.
La información referente al muestreo, procedencia, cantidad, fecha de obtención e identificación han sido proporcionadas por el cliente.




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

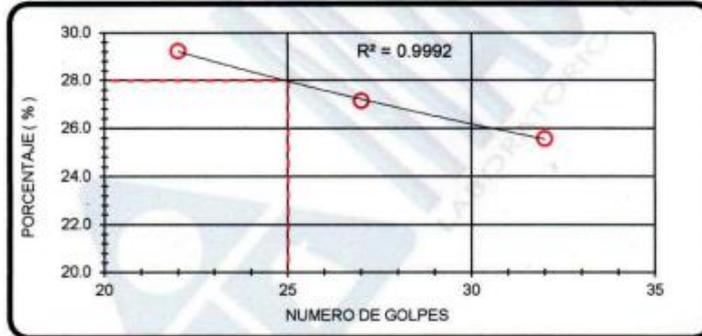
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente : 224_22_11
 Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
 Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de ensayo : 26/09/2022
 Fecha de emisión : 29/09/2022
 Ubicación del proyecto : Paita, Piura.

LIMITES DE CONSISTENCIA DE ATTERBERG ASTM D 4318

Referencia de la muestra:

Identificación : M- 01 + 2.5% cal Presentación : Sacos de polipropileno
 Cantidad : 60 kg aproximadamente

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	1	2
Ensayo Nº	1	2	3	1	2
Nro. de Recipiente	1	5	4	12	3
Masa de Recipiente (g)	17.20	15.10	14.30	15.40	14.40
Masa de Recipiente + Suelo Húmedo (g)	49.10	44.60	55.40	22.40	22.20
Masa Recipiente + Suelo Seco (g)	42.60	38.30	46.10	21.22	20.92
Nº De Golpes	32	27	22	---	---
Cantidad mínima requerida LL: 20 g / LP: 6 g	¡Cumple!	¡Cumple!	¡Cumple!	¡Cumple!	¡Cumple!
Aceptación de resultado (LL: R2>0.985 / LP: Ds < 2	1.000				
Contenido de Humedad (%)	25.6	27.2	29.2	20.3	19.6



Límite Líquido %	: 28
Límite Plástico %	: 20
Índice de Plasticidad	: 8



[Signature]
 JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
 INGENIERO CIVIL
 Reg. de CIP N° 84286

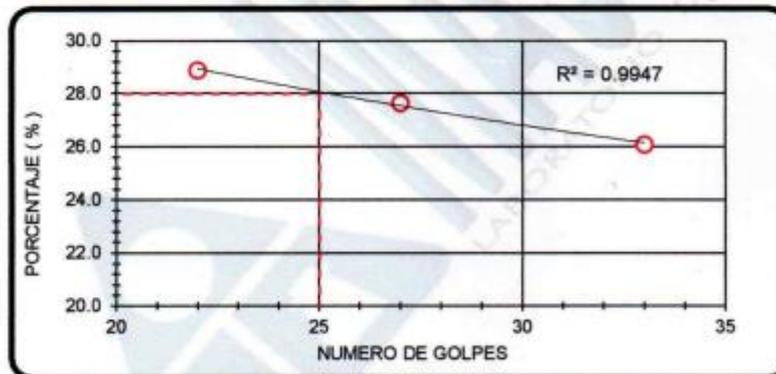
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente : 224_22_12
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en Fecha de ensayo : 28/09/2022
pavimentos industriales". Fecha de emisión : 29/09/2022
Ubicación del proyecto : Paíta, Piura.

LIMITES DE CONSISTENCIA DE ATTERBERG ASTM D4318

Referencia de la muestra:

Identificación : M- 01 + 3% cal Presentación : Sacos de polipropileno
Cantidad : 60 kg aproximadamente

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	1	2
Ensayo Nº	1	2	3	1	2
Nro. de Recipiente	1	5	4	12	3
Masa de Recipiente (g)	17.20	15.10	14.30	15.40	14.40
Masa de Recipiente + Suelo Húmedo (g)	49.10	44.60	54.90	22.40	22.20
Masa Recipiente + Suelo Seco (g)	42.50	38.21	45.80	21.14	20.90
Nº De Golpes	33	27	22	---	---
Cantidad mínima requerida LL: 20 g / LP: 6 g	¡Cumple!	¡Cumple!	¡Cumple!	¡Cumple!	¡Cumple!
Aceptación de resultado (LL: R2>0.985 / LP: Ds < 2	1.000				
Contenido de Humedad (%)	26.1	27.7	28.9	22.0	20.0



Límite Líquido %	: 28
Límite Plástico %	: 21
Índice de Plasticidad	: 7



Jorge Francisco Ramirez Japaja
JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

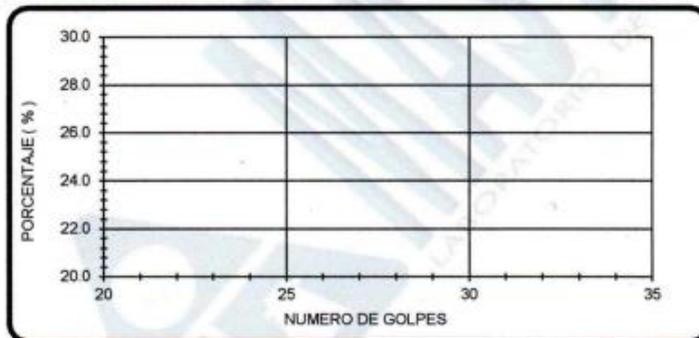
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente : 224_22_13
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de ensayo : 28/09/2022
Fecha de emisión : 29/09/2022
Ubicación del proyecto : Paita, Piura.

LIMITES DE CONSISTENCIA DE ATTERBERG ASTM D4318

Referencia de la muestra:

Identificación : M- 01 + 7% cemento Presentación : Sacos de polipropileno
Cantidad : 60 kg aproximadamente

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
Ensayo N°	No presenta	No presenta
Nro. de Recipiente		
Masa de Recipiente (g)		
Masa de Recipiente + Suelo Húmedo (g)		
Masa Recipiente + Suelo Seco (g)		
N° De Golpes		
Cantidad mínima requerida LL: 20 g / LP: 6 g		
Acceptación de resultado (LL: R2>0.985 / LP: Ds < 2)		
Contenido de Humedad (%)	--	--



Límite Líquido %	NP
Límite Plástico %	NP
Índice de Plasticidad	NP

Nota

La muestra no presenta límites de consistencia

NP= No presenta



JFR
JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286

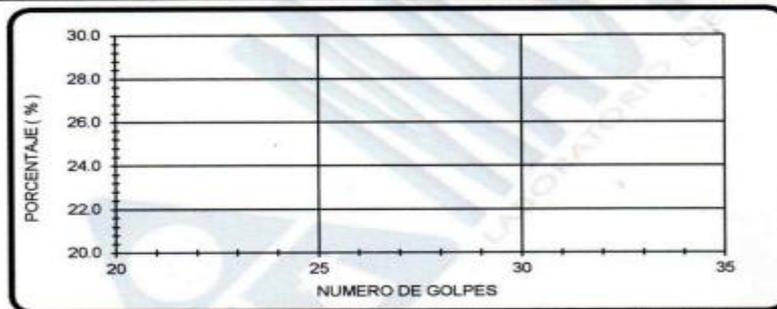
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Expendiente : 224_22_14
Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
Fecha de ensayo : 28/09/2022
Fecha de emisión : 29/09/2022
Ubicación del proyecto : Paíta, Piura.

LIMITES DE CONSISTENCIA DE ATTERBERG ASTM D4318

Referencia de la muestra:

Identificación : M- 01 + 8% cemento
Presentación : Sacos de polipropileno
Cantidad : 60 kg aproximadamente

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO
Ensayo N°	No presenta	No presenta
Nro. de Recipiente		
Masa de Recipiente (g)		
Masa de Recipiente + Suelo Húmedo (g)		
Masa Recipiente + Suelo Seco (g)		
N° De Golpes		
Cantidad mínima requerida LL: 20 g / LP: 6 g		
Aceptación de resultado (LL: R2>0.985 / LP: Ds < 2)		
Contenido de Humedad (%)	--	--



Límite Líquido %	NP
Límite Plástico %	NP
Índice de Plasticidad	NP

Nota

La muestra no presenta límites de consistencia
NP= No presenta




JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg. de CIP N° 84286



Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_15
 Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
 Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de ensayo : 26/09/2022
 Ubicación del proyecto : Paíta, Piura. Fecha de emisión : 29/09/2022

ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO PARA CBR ASTM D1557 / ASTM D1883

REFERENCIAS DE LA MUESTRA:

Identificación : M-01 con 3% de cal Presentación : Saco de polipropileno
 Cantidad : 60 kg aprox.

Nº de capas:	5	Altura de caída de pison:	45.72 cm	w del pison:	4.53 kg	Volumen del molde:	937.90
Energía de compactación modificada:	2700 kN-m/m ³		Numero de golpes/capas:		25 golpes		
Peso suelo húmedo + molde	(g)	3675.2	3776.7	3815.7	3788.1		
Peso del molde	(g)	1823.9	1823.9	1823.9	1823.9		
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1851.3	1952.8	1991.8	1964.2		
Volumen del molde	(cm ³)	937.9	937.9	937.9	937.9		
Densidad Húmeda	(g/cm ³)	1.974	2.082	2.124	2.094		

Recipiente N°		A	B	C	D
Peso suelo húmedo + recipiente	(g)	876.5	886.8	906.4	927.9
Peso suelo seco + recipiente	(g)	856.0	857.3	866.8	878.9
Peso del recipiente	(g)	411.9	413.0	409.5	410.2
Peso del agua	(g)	20.5	29.5	39.6	49.0
Peso suelo seco	(g)	444.1	444.3	457.3	468.7
Contenido de Humedad	(%)	4.62	6.64	8.66	10.45
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.887	1.952	1.954	1.896



PREPARACION DE LA MUESTRA		
Tamiz	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
3/4"	0.0	100
3/8"	0.0	100
Nº 4	1.8	98.2
MÉTODO		"A"
MDS	1.962	g/cm ³
OCH	7.83	%

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados. La muestra fue proporcionado por el cliente.



J. Ramirez
 JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
 INGENIERO CIVIL
 Reg de CIP N° 84286

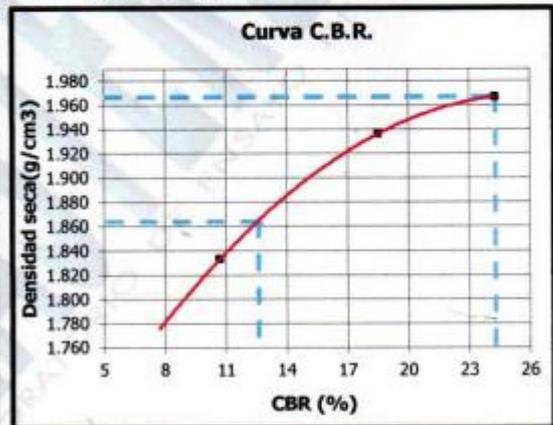
Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin
Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
Expediente N° : 224_22_16
Nombre de Proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales".
Fecha de Ensayo : 29/09/2022
Fecha de Emisión : 29/09/2022
Ubicación de Proyecto : Paita, Piura.
Identificación de muestra : M-01 + 3% de cal

MÉTODO DE ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (C.B.R.) DE SUELOS COMPACTADOS EN EL LABORATORIO ASTM D 1883

Muestra (Golpes)	Densidad Seca (g/cm ³)	Penetración (")	C.B.R. (%)	Expansión (%)
56	1.967	0.1	24.3	0.28
25	1.936	0.1	18.5	0.40
10	1.833	0.1	10.7	0.43

C.B.R. al 100 % de la Máxima Densidad Seca (%)	24.3
C.B.R. al 95 % de la Máxima Densidad Seca (%)	12.6

Máxima Densidad Seca Próctor (g/cm ³)	1.962
Óptimo Contenido de Humedad Próctor (%)	7.8



Observaciones:

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados.



[Signature]
JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
INGENIERO CIVIL
Reg de CIP N° 84286

Solicitante : Bach. Arce Figueroa Camille Jazmin Expediente N° : 224_22_17
 Bach. Blas Soto Brayand Lincoln
 Nombre del proyecto : "Tipo de estabilizadores para mejorar suelos colapsales en pavimentos industriales". Fecha de ensayo : 26/09/2022
 Fecha de emisión : 29/09/2022
 * Ubicación del proyecto : Paíta, Piura.

ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO PARA CBR ASTM D1557 / ASTM D1883

REFERENCIAS DE LA MUESTRA:

Identificación : M-01 incorporando 8% de cemento Presentación : Saco de polipropileno
 Cantidad : 60 kg aprox.

Nº de capas:	5	Altura de caída de pison:	45.72 cm	w del pison:	4.53 kg	Volumen del molde:	937.90
Energía de compactación modificado:	2700 kN-m/m ³		Numero de golpes/capas:		25 golpes		
Peso suelo húmedo + molde	(g)	3688.2	3789.7	3848.7	3809.1		
Peso del molde	(g)	1823.9	1823.9	1823.9	1823.9		
Peso suelo húmedo compactado	(g)	1864.3	1965.8	2024.8	1985.2		
Volumen del molde	(cm ³)	937.9	937.9	937.9	937.9		
Densidad Húmeda	(g/cm ³)	1.988	2.096	2.159	2.117		

Recipiente N°		F	G	H	M
Peso suelo húmedo + recipiente	(g)	867.6	897.1	916.6	918.7
Peso suelo seco + recipiente	(g)	846.0	865.5	874.7	868.6
Peso del recipiente	(g)	411.9	413.4	409.5	410.7
Peso del agua	(g)	21.6	31.6	41.9	50.1
Peso suelo seco	(g)	434.1	452.1	465.2	457.9
Contenido de Humedad	(%)	4.98	6.99	9.01	10.94
Densidad Seca	(g/cm ³)	1.894	1.959	1.980	1.908



PREPARACION DE LA MUESTRA		
Tamiz	Ret. Parcial (%)	Pasa (%)
3/4"	0.0	100
3/8"	0.0	100
Nº 4	1.8	98.2
METÓDO		"A"

MDS	1.982 g/cm ³
OCH	8.65 %

Observaciones

El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del laboratorio, salvo que la reproducción sea en su totalidad. El laboratorio no se hace responsable por el mal uso de los resultados presentados. La muestra fue proporcionado por el cliente.

Nota

No se puede realizar el C.B.R. porque el piston no penetra en la muestra



[Signature]
 JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA
 INGENIERO CIVIL
 Reg. de CIP N° 84286



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



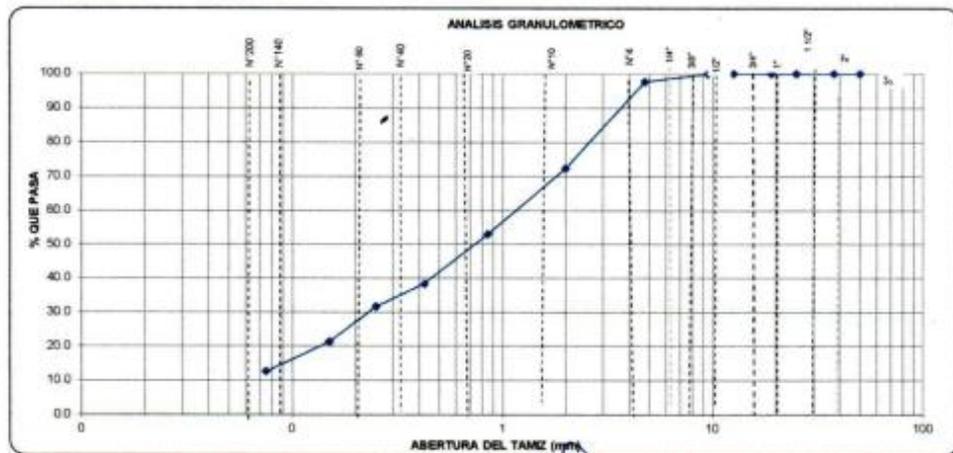
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO DE TESIS	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO	FECHA : 25 DE AGOSTO 2022

METODO DE ENSAYO PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO
(NTP 338.128)

UTM WGS 84	9438012 N ; 490557 E
PROFUNDIDAD	1.00-1.50 (m)
CALICATA	C-01 / M-02

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm.)	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO		DESCRIPCION DE LA MUESTRA
				RETENIDO (%)	QUE PASA (%)	
3"	75					PESO INICIAL (gr) 300.00
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0	PORCION DE FINOS (gr) 292.90
1 1/2"	37.5	0.0	0.0	0.0	100.0	CONTENIDO DE HUMEDAD 14.79
1"	25.0	0.0	0.0	0.0	100.0	TAMAÑO MAXIMO 0.00
3/4"	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0	% DE GRAVA 2.4
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0	% DE ARENA 95.0
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0	% PASANTE N° 200 12.6
4	4.75	7.1	2.4	2.4	97.6	LL 25.5
						LP 13.0
						IP 12.50
						CLASIFIC SUCS SC
						CLASIFIC AASHTO A-2-6 (0)
10	2.00	76.0	25.3	27.7	72.3	D10 0.074 C _u 15.681
20	0.85	58.0	19.3	47.0	53.0	D30 0.231 C _c 0.619
40	0.425	44.0	14.7	61.7	38.3	
60	0.250	20.0	6.7	68.4	31.6	
100	0.150	31.0	10.3	78.7	21.3	
200	0.075	26.0	8.7	87.4	12.6	
BANDEJA		37.9	12.6	100.0		OBSERVACIONES
						ARENA ARCILLOSA



Observacion : Material proporcionado por el Solicitante.

R.U.C. 20606962518
CEL: 950113084 - 948870464
geomech.laboratorio@gmail.com

GEOMECH

Ing. Mabuel Ericson Quiroga Pasicho
CSP N° 182454
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



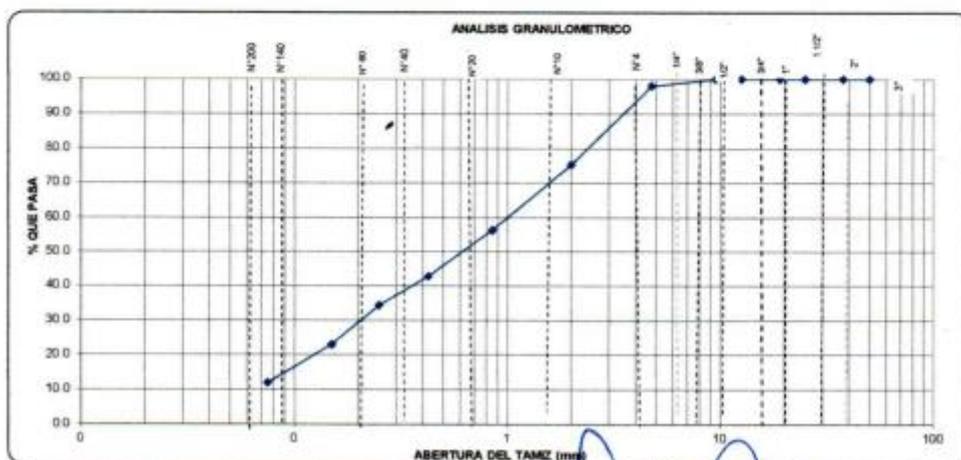
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO DE TESIS	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO	FECHA : 25 DE AGOSTO 2022

METODO DE ENSAYO PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO (NTP 339.128)

UTM WGS 84	9437981 N ; 490527 E
PROFUNDIDAD	0.60-1.50 (m)
CALICATA	C-02 / M-01

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm.)	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO			DESCRIPCION DE LA MUESTRA	
				RETENIDO (%)	QUE PASA (%)			
3"	75	0.0	0.0	0.0	100.0		PESO INICIAL (gr)	300.00
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0		PORCION DE FINOS (gr)	294.00
1 1/2"	37.5	0.0	0.0	0.0	100.0		CONTENIDO DE HUMEDAD	8.53
1"	25.0	0.0	0.0	0.0	100.0		TAMAÑO MAXIMO	0.00
3/4"	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0		% DE GRAVA	2.0
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0		% DE ARENA	98.0
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0		% PASANTE N° 200	12.0
4	4.75	6.0	2.0	2.0	98.0		L.L.	28.3
							L.P.	17.0
							I.P.	11.90
							CLASIFIC. SUCS	SP-SC
							CLASIFIC. AASHTO	A-2-6 (0)
							D10	0.074 C _u 13.540
							D30	0.206 C _c 0.570
							D60	1.003
							OBSERVACIONES:	
							ARENA ARCILLOSA	
10	2.00	68.0	22.7	24.7	75.3			
20	0.85	57.0	19.0	43.7	56.3			
40	0.425	41.0	13.7	57.3	42.7			
60	0.250	25.0	8.3	65.7	34.3			
100	0.150	34.0	11.3	77.0	23.0			
200	0.075	33.0	11.0	88.0	12.0			
BANDEJA		36.0	12.0	100.0				



Observacion : Material proporcionado por el Solicitante.

GEOMECH

Ingr. Manuel Erickson Chango Pascho
 VCI: N° 165464
 Exp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

R.U.C. 20606962518
 CEL: 950113084 - 948870464
 geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



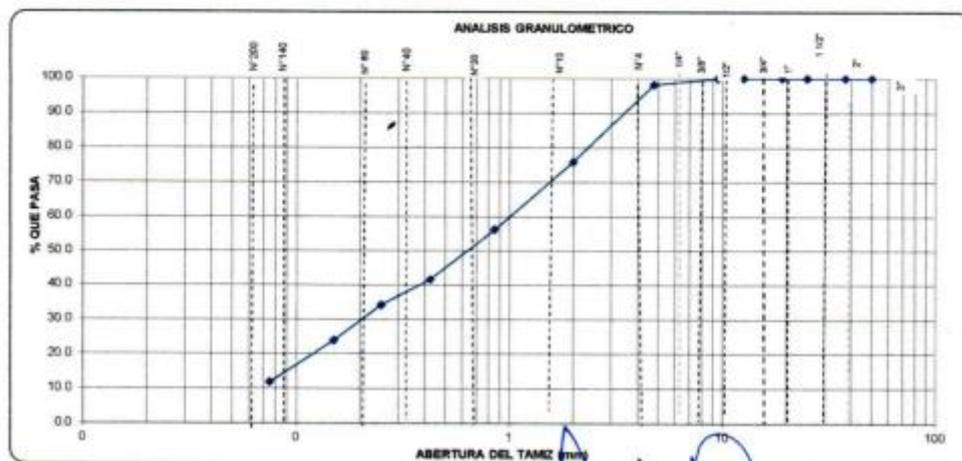
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO DE TESIS	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO	FECHA : 25 DE AGOSTO 2022

METODO DE ENSAYO PARA EL ANALISIS GRANULOMETRICO
(NTP 339.128)

UTM WGS 84	9437968 N ; 490498 E
PROFUNDIDAD	0.70-1.50 (m)
CALICATA	C-03M-01

TAMICES ASTM	ABIERTURA (mm.)	PESO RETENIDO (gr.)	PORCENTAJE PARCIAL RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO		DESCRIPCION DE LA MUESTRA
				RETENIDO (%)	QUE PASA (%)	
3"	75	0.0	0.0	0.0	100.0	PESO INICIAL (gr) 300.00
2"	50	0.0	0.0	0.0	100.0	PORCION DE FINOS (gr) 294.60
1 1/2"	37.5	0.0	0.0	0.0	100.0	CONTENIDO DE HUMEDAD 8.12
1"	25.0	0.0	0.0	0.0	100.0	TAMAÑO MAXIMO 0.00
3/4"	19.0	0.0	0.0	0.0	100.0	% DE GRAVA 1.8
1/2"	12.5	0.0	0.0	0.0	100.0	% DE ARENA 86.3
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0	% PASANTE N° 200 11.9
4	4.75	5.4	1.8	1.8	98.2	L.L. 29.1
10	2.00	67.0	22.3	24.1	75.9	L.P. 36.0
20	0.85	59.0	19.7	43.8	56.2	I.P. 13.08
40	0.425	44.0	14.7	58.5	41.5	CLASIFIC SUCS SP-SC
60	0.250	22.0	7.3	65.8	34.2	CLASIFIC AASHTO A-2-6 (0)
100	0.150	31.0	10.3	76.1	23.9	D10 0.074 C _u 13.552
200	0.075	35.0	12.0	88.1	11.9	D30 0.203 C _c 0.556
BANDEJA		35.6	11.9	100.0		OBSERVACIONES: ARENA ARCILLOSA



Observacion : Material proporcionado por el Solicitante.

GEOMECH

Ing. Manuel Edison Chunga Pascho
C.P. N° 102494
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

R.U.C. 20606962518
CEL: 950113084 - 948870464
geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO	FECHA : 25 DE AGOSTO 2022

MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS

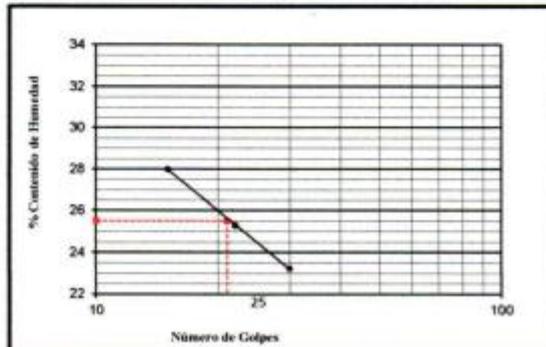
UTM WGS 84 PROFUNDIDAD CALICATA	9438012 N ; 490557 E 1.00-1.50 (m) C-01 / M-02
---------------------------------------	--

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS (NTP 339.129)

N°	MUESTRA	1	2	3
1	Tara N°	6	9	10
2	Peso de la Tara grs.	31.22	31.14	31.19
3	Peso Suelo Húmedo + Tara grs.	49.68	54.04	53.09
4	Peso Suelo Seco + Tara grs.	46.20	49.42	48.30
5	Peso del Agua (3) - (4) grs.	3.48	4.62	4.79
6	Peso Suelo Seco (4) - (2) grs.	14.98	18.28	17.11
7	Humedad (5) / (6) x 100 %	23.23	25.27	28.00
8	N° De Golpes	30	22	15

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO (NTP 339.129)

N°	MUESTRA	1	2
1	Tara N°	12	15
2	Peso de la Tara grs.	5.95	5.94
3	Peso Suelo Húmedo + Tara grs.	10.01	11.01
4	Peso Suelo Seco + Tara grs.	9.69	10.24
5	Peso del Agua (3) - (4) grs.	0.32	0.77
6	Peso Suelo Seco (4) - (2) grs.	3.74	4.30
7	Humedad (5) / (6) x 100 %	8.66	17.91
Promedio de Límite Plástico :		13.00	



RESULTADOS:	
L.L.	25.50
L.P.	13.00
I.P.	12.50

GEOMECH
Ing. Manuel Enrique Quevedo Pasicho
CIP. N° 49464
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

Observacion: Material proporcionado por el Solicitante.

R.U.C. 20606962518
CEL: 950113084 - 948870464
geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO	FECHA : 25 DE AGOSTO 2022

MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS

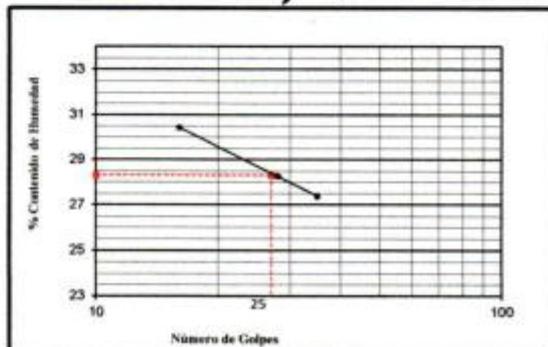
UTM WGS 84 PROFUNDIDAD CALICATA	9437981 N : 490527 E 0.60-1.50 (m) C-02 / M-01
---------------------------------------	--

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS (NTP 339.129)

N°	MUESTRA	1	2	3
1	Tara N°	1	24	12
2	Peso de la Tara grs.	30.90	30.00	30.40
3	Peso Suelo Húmedo + Tara grs.	84.40	79.00	91.70
4	Peso Suelo Seco + Tara grs.	72.90	68.20	77.40
5	Peso del Agua (3) - (4) grs.	11.50	10.80	14.30
6	Peso Suelo Seco (4) - (2) grs.	42.00	38.20	47.00
7	Humedad (5) / (6) x 100 %	27.4	28.3	30.4
8	N° De Golpes	35	28	16

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO (NTP 339.129)

N°	MUESTRA	1	2
1	Tara N°	1A	2A
2	Peso de la Tara grs.	25.60	25.70
3	Peso Suelo Húmedo + Tara grs.	39.10	36.10
4	Peso Suelo Seco + Tara grs.	36.90	36.60
5	Peso del Agua (3) - (4) grs.	2.20	1.50
6	Peso Suelo Seco (4) - (2) grs.	11.10	10.90
7	Humedad (5) / (6) x 100 %	19.8	13.8
Promedio de Límite Plástico :		17.00	



RESULTADOS:	
L.L. :	28.30
L.P. :	17.00
I.P. :	11.30

GEOMECH
 Ing. Manuel Ericson Chingá Pasicho
 CIP. N° 182464
 Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

Observacion: Material proporcionado por el Solicitante.

R.U.C. 20606962518
 CEL: 950113084 - 948870464
 geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PROYECTO	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES	
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO	FECHA : 25 DE AGOSTO 2022

MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO, E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS

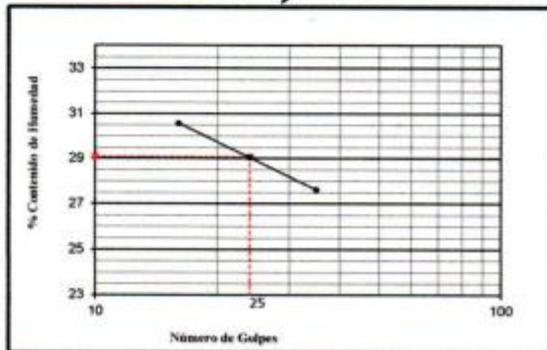
UTM WGS 84 PROFUNDIDAD CALICATA	9437988 N ; 490498 E 0.70-1.50 (m) C-03/M-01
---------------------------------------	--

DETERMINACION DEL LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS (NTP 339.129)

N°	MUESTRA	1	2	3
1	Tara N°	1	24	12
2	Peso de la Tara grs.	31.00	30.20	30.20
3	Peso Suelo Húmedo + Tara grs.	82.30	82.00	93.20
4	Peso Suelo Seco + Tara grs.	71.20	70.34	78.45
5	Peso del Agua (3) - (4) grs.	11.10	11.66	14.75
6	Peso Suelo Seco (4) - (2) grs.	40.20	40.14	48.25
7	Humedad (5) / (6) x 100 %	27.6	29.0	30.6
8	N°. De Golpes	35	24	15

DETERMINACION DEL LIMITE PLASTICO (NTP 339.129)

N°	MUESTRA	1	2
1	Tara N°	3A	5C
2	Peso de la Tara grs.	8.90	8.25
3	Peso Suelo Húmedo + Tara grs.	14.20	14.07
4	Peso Suelo Seco + Tara grs.	13.49	13.19
5	Peso del Agua (3) - (4) grs.	0.71	0.88
6	Peso Suelo Seco (4) - (2) grs.	4.99	4.94
7	Humedad (5) / (6) x 100 %	14.5	17.8
Promedio de Límite Plástico :		16.00	



RESULTADOS.	
L.L. :	29.08
L.P. :	16.00
I.P. :	13.08

GEOMECH
 Ing. Manuel Ericson Guzmán Pláche
 CIP. N° 152452
 Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

Observacion: Material proporcionado por el Solicitante.

R.U.C. 20606962518
 CEL: 950113084 - 948870464
 geomech.laboratorio@gmail.com

LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

**PROCTOR MODIFICADO
AASTHO T-180-D/MTC E 115**

PROYECTO DE TESIS	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES		
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO		
UBICACIÓN	PAITA - PIURA		
CALICATA	C-01 / M-02	FECHA	25 DE AGOSTO DE 2022

VOLUMEN DEL MOLDE (cm3)	943				PESO DEL MOLDE (gr.) :	1770			
NUMERO DE ENSAYOS	1	2	3	4					
PESO SUELO + MOLDE	3310	3455	3610	3540					
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO	1540	1685	1840	1770					
PESO VOLUMETRICO HUMEDO	1.633	1.787	1.951	1.877					
CONTENIDO DE HUMEDAD									
RECIPIENTE Nro.	1	2	3	4					
PESO SUELO HUMEDO	88.30	111.50	109.10	138.10					
PESO SUELOS SECO	85.60	105.10	100.00	122.80					
PESO DE LA TARA									
PESO DE AGUA	2.70	6.40	9.10	15.30					
PESO DE SUELO SECO	85.60	105.10	100.00	122.80					
CONTENIDO DE AGUA	3.15	6.09	9.10	12.46					
PESO VOLUMETRICO SECO	1.583	1.684	1.788	1.669					
DENSIDAD MAXIMA SECA:	1.788				HUMEDAD OPTIM	9.10 %			

GRAFICO DEL PROCTOR



OBSERVACIONES :
METODO : A
DIAMETRO DEL MOLDE : 4 "

GEOMECH
Ing. Mandel Ereson Obando Pasiche
CIP. N° 126834
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

R.U.C. 20606962518
CEL: 950113084 - 948870464
geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

**PROCTOR MODIFICADO
AASTHO T-180-D/MTC E 115**

PROYECTO DE TESIS	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES		
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO		
UBICACIÓN	PAITA - PIURA		
CALICATA	C-02 / M-01	FECHA	25 DE AGOSTO DE 2022

VOLUMEN DEL MOLDE (cm3)	943				PESO DEL MOLDE (gr) :	1770			
NUMERO DE ENSAYOS	1	2	3	4					
PESO SUELO + MOLDE	3378	3495	3586	3540					
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO	1608	1725	1816	1770					
PESO VOLUMETRICO HUMEDO	1.705	1.829	1.926	1.877					
CONTENIDO DE HUMEDAD									
RECIPIENTE Nro.	1	2	3	4					
PESO SUELO HUMEDO	165.80	142.70	129.68	118.40					
PESO SUELOS SECO	159.70	134.48	120.02	105.04					
PESO DE LA TARA									
PESO DE AGUA	6.10	8.22	9.66	13.36					
PESO DE SUELO SECO	159.70	134.48	120.02	105.04					
CONTENIDO DE AGUA	3.82	6.11	8.05	12.72					
PESO VOLUMETRICO SECO	1.642	1.724	1.782	1.665					
DENSIDAD MAXIMA SECA:	1.782				HUMEDAD OPTIM	8.05 %			

GRAFICO DEL PROCTOR



OBSERVACIONES :
METODO : A
DIAMETRO DEL MOLDE : 4 "

GEOMECH
Ing. Manuel Erico Pasiche
CIP. N° 18299
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

R.U.C. 20606962518
CEL: 950113084 - 948870464
geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

**PROCTOR MODIFICADO
AASHTO T-180-D/MTC E 115**

PROYECTO DE TESIS	TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES		
SOLICITA	BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO		
UBICACIÓN	PAITA - PIURA		
CALICATA	C-03 / M-01	FECHA	25 DE AGOSTO DE 2022

VOLUMEN DEL MOLDE (cm3)	943	PESO DEL MOLDE (gr) :				1770
NUMERO DE ENSAYOS		1	2	3	4	
PESO SUELO + MOLDE		3423	3563	3615	3547	
PESO SUELO HUMEDO COMPACTADO		1653	1793	1845	1777	
PESO VOLUMETRICO HUMEDO		1.753	1.901	1.966	1.885	
CONTENIDO DE HUMEDAD						
RECIPIENTE Nro.		1	2	3	4	
PESO SUELO HUMEDO		164.80	144.80	131.50	117.40	
PESO SUELOS SECO		159.10	135.90	121.50	105.50	
PESO DE LA TARA						
PESO DE AGUA		5.70	8.90	10.10	11.90	
PESO DE SUELO SECO		159.10	135.90	121.50	105.50	
CONTENIDO DE AGUA		3.58	6.55	8.31	11.28	
PESO VOLUMETRICO SECO		1.692	1.784	1.806	1.694	
DENSIDAD MAXIMA SECA:	1.806	HUMEDAD OPTIM			8.31	%

GRAFICO DEL PROCTOR



OBSERVACIONES :
METODO : A
DIAMETRO DEL MOLDE : 4 "

GEOMECH
Ing. Manuel Ernesto Chirunga Pasicho
CIP No 182954
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

R.U.C. 20606962518
CEL: 950113084 - 948870464
geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS CIVILES Y AGRICOLAS,
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATIO

PROYECTO DE TESIS : TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES

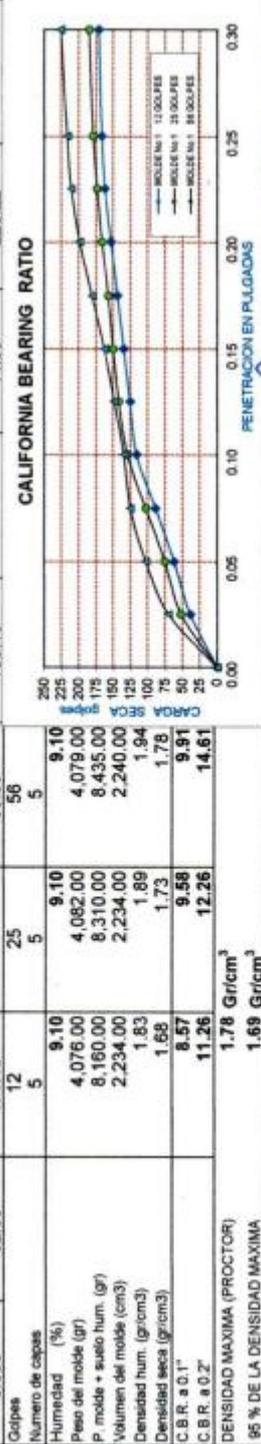
SOLICITA : BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO

UBICACION : PAITA - PIURA

MUESTRA : C-01 / M-02

FECHA : 25 DE ABRIL DEL 2022

PENETRACION	MOLDE No 1 12 GOLPES		MOLDE No 1 25 GOLPES		MOLDE No 1 56 GOLPES	
	Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.
0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.025	3.00	38.93	6.00	52.63	10.00	70.91
0.050	8.00	61.77	11.00	75.47	17.00	102.88
0.075	14.00	89.18	17.00	102.88	22.00	125.72
0.100	20.00	116.59	23.00	130.29	24.00	134.86
0.125	22.00	125.72	25.60	142.17	27.00	148.56
0.150	24.00	134.86	27.40	150.39	30.20	163.18
0.175	26.00	143.99	29.00	157.70	34.20	181.45
0.200	28.00	153.13	31.00	166.83	38.00	198.81
0.225	30.00	162.27	32.50	173.89	40.70	211.14
0.250	31.00	166.83	33.80	179.62	42.00	217.08
0.300	32.00	171.40	35.00	185.10	44.00	226.22





GEOMECH

S.O.A. SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

**CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS CIVILES Y AGRICOLAS,
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**



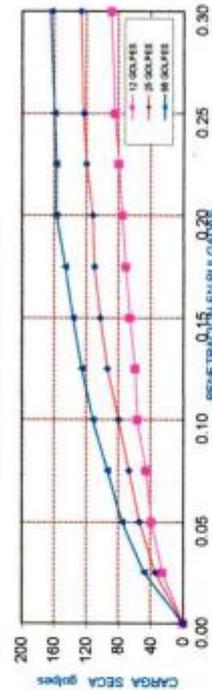
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATIO

PROYECTO DE : TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES
 TESIS :
 SOLICITA : BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO
 UBICACIÓN : PAITA - PIURA
 MUESTRA : C-2 / M-1
 FECHA : 25 DE AGOSTO DEL 2022.

PENETRACION	12 GOLPES			25 GOLPES			56 GOLPES		
	Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Corregido C.B.R %	Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Corregido C.B.R %	Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Corregido C.B.R %
0.000	0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00	
0.025	0.00	25.23		4.00	43.50		5.00	48.07	
0.050	3.00	38.93		9.00	66.34		14.00	89.18	
0.075	7.00	57.20		13.00	84.61	7.90	21.00	121.15	9.95
0.100	12.00	80.04	5.88	18.00	107.45		24.10	135.31	
0.125	13.00	84.61		19.00	112.02		27.00	148.56	
0.150	14.50	91.46		21.00	121.15		29.00	157.70	
0.175	16.50	109.73		22.00	125.72	11.59	32.30	172.77	12.97
0.200	26.00	143.99	10.58	29.00	157.70		33.10	176.43	
0.225	27.00	148.56		31.00	166.83		35.00	185.10	
0.250	28.00	153.13		32.00	171.40		38.00	198.81	
0.300	29.90	161.81		34.00	180.54		40.00	207.94	
Golpes									
Numero de capas		12	25		56				
Humedad (%)		5	5		5				
Peso del molde (gr)		8.05	8.05		8.05				
P. molde + suelo hum. (gr)		4.071.00	4.079.00		4.075.00				
Volumen del molde (cm ³)		8.210.00	8.314.00		8.385.00				
Densidad hum. (gr/cm ³)		2.234.00	2.269.00		2.240.00				
Densidad seca (gr/cm ³)		1.85	1.87		1.92				
C.B.R. a 0.1"		1.71	1.73		1.78				
C.B.R. a 0.2"		5.88	7.90		9.95				
DENSIDAD MAXIMA (PROCTOR)		10.58	11.59		12.97				
95% DENSIDAD MAXIMA		1.78	1.692		1.692				

CALIFORNIA BEARING RATIO





GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

**CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS CIVILES Y AGRICOLAS,
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

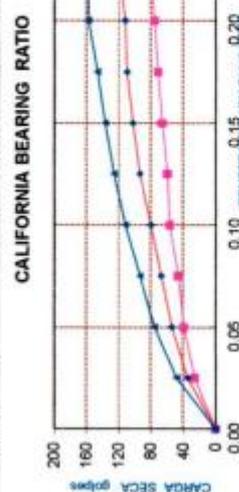


**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS
ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATIO**

PROYECTO DE : TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES
 TESIS :
 SOLICITA : BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO
 UBICACION : PAITA - PIURA
 MUESTRA : C-3/M-1
 FECHA : 25 DE AGOSTO DEL 2022.

PENETRACION	12 GOLPES		28 GOLPES		56 GOLPES	
	MOLDE No Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Corregido C.B.R. %	MOLDE No Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.	Corregido C.B.R. %
0.000	0.00	0.00		0.00	0.00	
0.025	0.00	25.23		5.00	48.07	
0.050	7.00	57.20		9.50	68.62	
0.075	9.00	66.34	5.72	12.60	82.78	7.09
0.100	11.50	77.76		15.60	96.49	
0.125	14.30	90.55		17.90	106.99	
0.150	17.50	105.17		20.50	118.87	
0.175	19.60	114.76	9.41	22.80	128.46	10.26
0.200	22.50	128.01		25.05	139.95	
0.225	24.30	136.23		27.00	148.56	
0.250	26.00	143.99		29.00	157.70	
0.300	28.70	156.33		31.00	166.83	

Golpes		25		56	
Numero de capas	Humedad (%)	Corregido C.B.R. %	Corregido C.B.R. %	MOLDE No Sin corregir Lectura Cuadrante	Carga Kg.
5	8.31	5	5	56	210.23
	4.071.00	8.31	8.31	5	210.23
P. molde + suelo hum. (gr)	4,079.00	4,079.00	8.31	5	210.23
Volumen del molde (cm ³)	8,347.00	8,347.00	8.31	5	210.23
Densidad hum. (gr/cm ³)	2,269.00	2,269.00	8.31	5	210.23
Densidad seca (gr/cm ³)	1.84	1.88	8.31	5	210.23
C.B.R. a 0.1"	1.70	1.74	8.31	5	210.23
C.B.R. a 0.2"	5.72	7.09	8.31	5	210.23
	9.41	10.26	8.31	5	210.23
DENSIDAD MAXIMA (PROCTOR)	1.80 Gr/cm ³				
95% DENSIDAD MAXIMA	1.705 Gr/cm ³				





GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ANÁLISIS QUÍMICO POR AGRESIVIDAD

PROYECTO : TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES
SOLICITANTE : BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO
UBICACIÓN : PAITA - PIURA
CALICATA : C - 1 / M - 2
PROFUNDIDAD : 1.00 - 1.50 mt
FECHA : 25 DE AGOSTO DEL 2022

RESULTADOS

DETERMINACION	
CLORUROS (Cl-) (%)	0.088
CARBONATOS (CaCO ₃) (%)	43.70
SALES SOLUBLES (S.S.) (%)	1.78


GEOMECH

Ing. Manuel Erickson Churrua Pasleuna
CIP. N° 34249
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ANALISIS QUIMICO POR AGRESIVIDAD

PROYECTO	: TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES
SOLICITANTE	: BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO
UBICACIÓN	: PAITA - PIURA
CALICATA	: C - 2 / M - 1
PROFUNDIDAD	: 0.60 - 1.50 mt
FECHA	: 25 DE AGOSTO DEL 2022

RESULTADOS

DETERMINACION	
CLORUROS (Cl-) (%)	0.091
CARBONATOS (CaCO ₃) (%)	47.80
SALES SOLUBLES (S.S.) (%)	1.24


GEOMECH
Ing. Manuel Ericson Cárdena Pasioche
CIP. N° 182594
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS



LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ANALISIS QUIMICO POR AGRESIVIDAD

PROYECTO : TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES
SOLICITANTE : BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO
UBICACIÓN : PAITA - PIURA
CALICATA : C - 3 / M - 1
PROFUNDIDAD : 0.60 - 1.50 mt
FECHA : 25 DE AGOSTO DEL 2022

RESULTADOS

DETERMINACION	
CLORUROS (Cl-) (%)	0.083
CARBONATOS (CaCO ₃) (%)	48.21
SALES SOLUBLES (S.S.) (%)	1.64

GEOMECH
Ing. Manuel Erickson Chunga Pasicho
CIP. N° 149484
Esp. Geología, Geotecnia y Mec. de Suelos

**GEOMECH**

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS****ENSAYO DE DENSIDAD DE CAMPO**

MÉTODO DE CONO DE ARENA /MTC E 117 -AASHTO T 191 93 -ASTM D 1556

PROYECTO DE TESIS	: TIPOS DE ESTABILIZADORES PARA MEJORAR SUELOS COLAPSABLES EN PAVIMENTOS INDUSTRIALES
SOLICITA	: BACH. CAMILLE J. ARCE FIGUEROA - BACH. BRAYAND L. BLAS SOTO
UBICACIÓN	: PAITA - PIURA

FECHA	25/08/2022
--------------	------------

	DESCRIPCION	CALICATA 03 MUESTRA 01
1	Peso del frasco + arena (gr)	7600.00
2	Peso del frasco +arena sobrante (gr)	2250.00
3	Peso de la arena empleada (gr)	5350.00
4	Peso de la arena del cono(gr)	1680.00
5	Peso de la arena del hueco (gr)	3670.00
6	Densidad de la arena (gr/cm3)	1.41
7	Volumen del hueco (cm3)	2602.84
8	Peso del tarro + suelo +grava (gr)	4030.00
9	Peso del tarro (gr)	0.00
10	Peso de suelo + grava (gr)	4030.00
11	Peso retenido en tamiz > 3/4" (gr)	0.00
12	Peso especifico 2 (gr/cm3)	0.00
13	Volumen de la grava (cm3)	0.00
14	Peso seco de los finos (gr)	4030.00
15	Volumen de los finos (cm3)	2602.84
16	Densidad muestra humedad (gr/cm3)	1.55
CONTENIDO DE HUMEDAD		
17	Peso del recipiente + suelo humedo (gr)	SPEEDY - AASHTO T - 217
18	Peso del recipiente + suelo seco (gr)	
19	Peso de agua (gr)	
20	Peso del recipiente (gr)	
21	Peso suelo seco (cm3)	
22	Contenido de humedad (%)		8.00
DENSIDAD NATURAL		1.43

OBSERVACIONES	:
----------------------	---

GEOMECH

 Ing. Manuel Erickson Cordero Pasikhe
 CIP. N° 163484
 Esp. Dedicada: Geotecnia y Mec. de Suelos

R.U.C. 20606962518
 CEL: 950113084 - 948870464
 geomech.laboratorio@gmail.com



GEOMECH

SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

**CONSTRUCCIÓN, CONSULTORIA, DISEÑO E INSTALACION DE PROYECTOS
CIVILES Y AGRICOLAS, LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS**

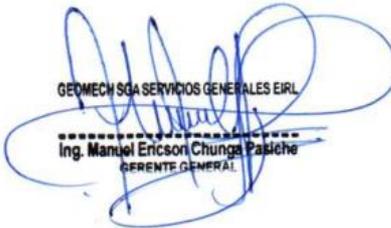


Lima, 12 de noviembre de 2022

Por la presente, autorizamos al Sr Brayand Blas Soto y la Srt Camille Arce Figueroa, fin de que puedan utilizar los datos de ensayos de laboratorio de mecánica de suelos , figuras, o fotografías de la empresa para la elaboración de su tesis.

Sin otro particular, me despido

Atentamente,


GEOMECH SGA SERVICIOS GENERALES E.I.R.L.

Ing. Manuel Ericson Chunga Pacheco
GERENTE GENERAL



Fecha: Lima, 14 de noviembre de 2022

Atención: A quien corresponda

Asunto: Autorización de uso de imágenes de ensayos de laboratorio tesis "Tipos de estabilizaciones para mejorar suelos colapsables en pavimentación industrial"

De: Laboratorio de ensayos de materiales empresa MASTERLEM S.A.C.

En virtud de lo indicado, la empresa MASTERLEM S.A.C. con Ruc 20506076235 autoriza al Sr. Brayand Blas Soto y la Srta. Camille Arce Figueroa utilizar los informes, figuras, o fotografías de los ensayos realizados en la elaboración de su tesis.

Se expide el siguiente documento

Sin otro particular, me despido

Atentamente,



Juan Medina Abanto
(Gerente General Masterlem S.A.C.)

