

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



INFLUENCIA DEL ADITIVO SIKA DUST SEAL COMO AGENTE ESTABILIZADOR DE SUELOS EN LA TROCHA CARROZABLE TRAMO LA SERMA - TAMBILLO JAEN, CAJAMARCA

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por el Bachiller:

LINBERG CHINCHAY DÍAZ

Asesor

Ing. MARCO WILDER HOYOS SAUCEDO

Cajamarca, Diciembre del 2018

AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a Dios por llenarme de bendiciones y darme su soporte día a día.

A mis padres: José y Magdalena, ya que con su cariño, apoyo incondicional, contribuyeron siempre en mi formación personal y profesional.

A mi asesor, Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo, por su dedicación, paciencia, comprensión y soporte durante la elaboración del proyecto de investigación.

A los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil – Sede Jaén, por haberme transmitido sus conocimientos y experiencias durante los años en mi formación profesional como alumno.

LINBERG

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Para mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

En recompensa a ellos es que les dedico este humilde trabajo.

LINBERG

CONTENIDO

Contenido	Pág.
Agradecimiento.....	II
Dedicatoria.....	III
Contenido.....	IV
Índice de Tablas.....	VIII
Índice de Figuras.....	IX
Índice de Fotografías.....	X
Resumen.....	XI
Abstract.....	XII

CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1. Planteamiento del Problema.....	13
1.2. Formulación del Problema.....	13
1.3. Justificación de la Investigación.....	14
1.4. Alcances o delimitación de la Investigación.....	14
1.5. Limitaciones.....	14
1.6. Objetivos.....	14
1.7. Hipótesis.....	15
1.8. Definición de variables.....	15

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes teóricos de la investigación.....	16
2.1.1. A nivel Internacional.....	16
2.1.2. A nivel Nacional.....	16
2.2. Bases Teóricas.....	18
2.2.1. Estabilización de suelos.....	18
2.2.1.1. Definiciones.....	18
2.2.2. Tipos de Estabilización de Suelos.....	18
2.2.2.1. Estabilización Física.....	18
2.2.2.2. Estabilización Química.....	19
2.2.2.3. Estabilización Mecánica.....	20
2.2.3. Mecánica de Suelos.....	22

2.2.3.1. Definiciones.....	22
2.2.3.2. El suelo.....	22
2.2.3.2.1. Definiciones.....	22
2.2.3.3. Clasificación de suelos.....	22
2.2.3.3.1. Sist. Unificado de Clasif. de Suelos (SUCS).....	23
2.2.3.3.2. Sistema AASHTO.....	24
2.2.3.4. Ensayos en Mecánica de Suelos.....	26
2.2.3.4.1. Análisis Granulométrico.....	26
2.2.3.4.2. Límites de Atterberg (Consistencia de Suelos).....	29
2.2.3.4.3. Ensayo proctor	31
2.2.3.4.4. Valor de Soporte California (CBR).....	32
2.2.4. Estabilización de suelos con Sika Dust Seal.....	36
2.2.4.1. Sika Dust Seal.....	36
2.2.4.2. Datos experimentales.....	37
2.2.5. Propiedades de un suelo estabilizado.....	37
2.2.5.1. Resistencia.....	37
2.2.5.2. Durabilidad.....	37
2.2.5.3. Estabilidad Volumétrica.....	38
2.2.5.4. Permeabilidad.....	38
2.2.5.5. Compresibilidad.....	38

CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Metodología de la Investigación.....	39
3.1.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación.....	39
3.1.2. Unidad de análisis.....	41
3.1.3. Población de estudio.....	41
3.1.4. Muestra.....	41
3.1.5. Ubicación del proyecto.....	42
3.1.6. Exploración de campo.....	43
3.1.7. MTC E 106/NTP 339.089. Obtención en laboratorio de muestras representativas (Cuarteo).....	43
3.1.8. MTC E 204/NTP 339.128. Método de ensayo para el análisis granulométrico.....	44

3.1.9. MTC E 110/MTC E 111/NTP 339.129. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.....	45
3.1.10. NTP 339.134. Método de clasificación de suelos con propósitos de ingeniería (SUCS).....	46
3.1.11. NTP 339.135. Método de clasificación de suelos para usos en vías de transporte (AASHTO).....	47
3.1.12. MTC E 115/NTP 339.141. Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada – proctor modificado.....	47
3.1.13. MTC E 132/NTP 339.145. Método de ensayo de CBR (Relación de soporte califonia) de suelos compactados en laboratorio.....	50
3.1.14. Ensayo proctor modificado basándose en la norma NTP 330.141 + aditivo Sika Dust Seal.....	52
3.1.15. Ensayo de CBR (Relación de soporte California) basándose en la Norma NTP 330.145 + aditivo Sika Dust Seal.....	56

CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. Técnicas e instrumentos de recolección de Datos.....	59
4.2. Análisis e interpretación de datos.....	59
4.3. Resumen de los ensayos realizados en laboratorio.....	59
4.3.1. Resumen de la Granulometría de suelos.....	59
4.3.2. Resumen de ensayos de Límites de Consistencia (Límites de Atterberg).....	60
4.3.3. Resumen clasificación de suelos.....	60
4.3.4. Resumen de ensayo Proctor Modificado.....	61
4.3.5. Resumen de Ensayo C.B.R. – sin aditivo.....	62
4.3.6. Resumen ensayo proctor modificado + aditivo Sika Dust Seal.....	63
4.3.7. Resumen ensayo C.B.R. + aditivo Sika Dust Seal.....	64
4.3.8. Porcentajes de aumento de CBR de los diversos ensayos.....	65

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones.....	68
------------------------	----

5.2. Recomendaciones.....69

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

Índice de Tablas

Tabla 01: Sistema Unificado de clasificación de Suelos (SUCS).....	23
Tabla 02: Clasificación de materiales para subrasante de carreteras.....	26
Tabla 03: Significado de Curvas granulométricas (% que pasa Vs Tamaño de partículas).....	28
Tabla 04: Usos de materiales de acuerdo al CBR.....	33
Tabla 05: Cargas Unitarias patrón – CBR.....	35
Tabla 06: Usos de material según CBR.....	36
Tabla 07: Datos experimentales del uso de aditivo Sika Dust Seal.....	37
Tabla 08: Accesos a la zona de estudio.....	42
Tabla 09: Ubicación de calicatas exploradas.....	43
Tabla 10: Determinación procedimiento de ensayo Proctor Modificado.....	48
Tabla 11: Resumen, cálculo de solución - ensayo proctor modificado (Con Aditivo).....	55
Tabla 12: Resumen, cálculo solución - ensayo CBR (Con Aditivo).....	56
Tabla 13: Resumen de parámetros de clasificación – Granulometría.....	59
Tabla 14: Resumen ensayo límites de consistencia (Límites de Atterberg).....	60
Tabla 15: Resumen clasificación de suelos SUCS y AASHTO.....	61
Tabla 16: Resumen de ensayos Proctor Modificado sin aditivo.....	62
Tabla 17: Resumen de ensayo C.B.R. para 0.1” de penetración.....	62
Tabla 18: Resumen de ensayo C.B.R. para 0.2” de penetración.....	63
Tabla 19: Resumen de ensayo proctor modificado + aditivo Sika Dust Seal.....	63
Tabla 20: Resumen de ensayo CBR + aditivo para 0.1” de penetración.....	64
Tabla 21: Resumen de ensayo CBR + aditivo para 0.2” de penetración.....	65
Tabla 22: Resumen de porcentajes de aumento de CBR% al 95% y 100% de la MDs para 0.1” de penetración.....	66
Tabla 23: Resumen de porcentajes de aumento de CBR% al 95% y 100% de la MDs para 0.2” de penetración.....	67

Índice de Figuras

Figura 01: Curvas Granulométricas.....	27
Figura 02: Estados de un suelo.....	30
Figura 03: Cálculo de humedad de un suelo (N° de golpes Vs humedad) – Límite Líquido.....	30
Figura 04: Curva Esfuerzo Vs Penetración (Corrección de Origen).....	35

Índice de Fotografías

Fotografía 01: Fotografía Calicata C-02.....	42
Fotografía 02: Método del cuarteo de muestras Calicata C-01.....	44
Fotografía 03: Análisis Granulométrico por tamizado Calicata C-02.....	45
Fotografía 04: Ensayo Límite Líquido Calicata C-03.....	46
Fotografía 05: Ensayo Límite Plástico Calicata C-03.....	46
Fotografía 06: Ensayo proctor modificado Calicata C-01.....	49
Fotografía 07: Máquina de carga para realizar ensayo CBR.....	50
Fotografía 08: Moldes para el ensayo CBR de la calicata C-02.....	51
Fotografía 09: Cantidad de solución preparada para ensayo calicata C-01	53
Fotografía 10: Mezcla de suelo con contenido óptimo de humedad para ensayo C.B.R. – espécimen 01 en calicata C- 01($W_{\text{ópt.}}=3.45\%$).....	56
Fotografía 11: Ensayo de penetración en especímenes de calicata C-01 (Con Aditivo Sika Dust Seal).....	58

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en el ámbito del distrito de Bellavista, entre los anexos la Serma y Tambillo, cuyo objetivo de estudio fue determinar la influencia del aditivo Sika Dust Seal como agente estabilizador de suelos en la trocha carrozable del tramo en estudio. Para la investigación se tomaron muestras de calicatas realizadas a 1.50 m de profundidad en diversos puntos de la trocha carrozable, para así poder determinar en el laboratorio de suelos el tipo de suelo que actualmente se encuentra en la trocha a nivel de subrasante y posteriormente someterlo a las pruebas y/o ensayos respectivos haciendo uso del aditivo Sika Dust Seal.

Ya identificado el tipo de suelo (GP, GW, SP-SC, según SUCS y A-2-4 según AASHTO) y obtenidas algunas propiedades físicas se procedió a agregar a las diversas muestras obtenidas, el aditivo Sika Dust Seal en proporciones diferentes. Para el ensayo Proctor Modificado con aditivo, se calcularon las siguientes proporciones de aditivo teniendo como referencia los datos que brindan la ficha técnica del producto, estos son: 6.37 cm³, 8.49 cm³ y 10.62 cm³ de Sika Dust Seal; seguidamente por cada combinación (aditivo + agua) calculada se realizó el ensayo proctor modificado y se obtuvo un contenido óptimo de humedad el cual nos sirvió para realizar el ensayo C.B.R.

Con el contenido óptimo de humedad obtenido de cada ensayo proctor modificado, se realizó el cálculo de una nueva solución para el ensayo C.B.R. Por ello se tomó como referencia la calicata 01 y para la combinación 01 el cual tiene un contenido óptimo de humedad del 3.45%, esta humedad se utilizó para los tres puntos (12, 25 y 56 golpes) del ensayo C.B.R., donde se obtuvo la siguiente dosificación: 200.63 cm³ de agua y 6.37 cm³ de aditivo, el mismo procedimiento se realizó para las demás combinaciones. Luego se realizó el ensayo de CBR y se concluyó que existe un aumento del CBR (al 95% de la máxima densidad seca para 0.1" de penetración) favorable en la calicata 01, calicata 02, calicata 03 y calicata 04, en un 27.91%, 30.23%, 19.55% y 28.23% respectivamente.

Palabras clave: Aditivo, Calicatas, Trocha Carrozable, Subrasante, Sika Dust Seal, proctor modificado, CBR, Estabilizador.

ABSTRACT

The present investigation was developed in the district of Bellavista, between the annexes Serma and Tambillo, whose objective of study was to determine the influence of the additive Sika Dust Seal as stabilizing agent of soils in the truck path of the section under study. For the investigation, samples were taken from pits made at 1.50 m depth at various points of the truck path, in order to determine in the soil laboratory the type of soil that is currently on the trail at subgrade level and then subject it to the respective tests and / or tests using the Sika Dust Seal additive.

Once the soil type was identified (GP, GW, SP-SC, according to SUCS and A-2-4 according to AASHTO) and some physical properties were obtained, the Sika Dust Seal additive was added to the various samples obtained in different proportions.

For the Proctor Modified with additive test, the following additive proportions were calculated taking as reference the data provided by the product data sheet, these are: 6.37 cm³, 8.49 cm³ and 10.62 cm³ of Sika Dust Seal; Then, for each combination (additive + water) calculated, the modified proctor test was carried out and an optimum moisture content was obtained, which served to carry out the C.B.R.

With the optimum moisture content obtained from each modified proctor test, a new solution was calculated for the C.B.R. For this reason the pouch 01 was taken as reference and for the combination 01 which has an optimum moisture content of 3.45%, this humidity was used for the three points (12, 25 and 56 strokes) of the CBR test, where the following dosage: 200.63 cm³ of water and 6.37 cm³ of additive, the same procedure was carried out for the other combinations. Then the CBR test was carried out and it was concluded that there is an increase in the CBR (95% of the maximum dry density for 0.1 "of penetration) favorable in pit 01, pit 02, pit 03 and pit 04, in 27.91% , 30.23%, 19.55% and 28.23% respectively.

Keywords: Additive, Calicates, Carrying Track, Subgrade, Sika Dust Seal, modified proctor, CBR, Stabilizer.

CAPITULO I. INTRODUCCION

La inestabilidad de subrasantes de vías no pavimentadas, trochas carrozables del distrito de Bellavista, demandan gastos adicionales a los transportistas, contaminación al medio ambiente, riesgos a la salud humana. En la actualidad el desconocimiento de las nuevas tecnologías acerca del uso de aditivos que mejoran las propiedades físicas y mecánicas de los suelos ha traído consigo un considerable gasto, ocasionado por el mantenimiento, reparación y rehabilitación de las vías o caminos que se les hace cada cierto período. Esto se debe a la inestabilidad de los suelos existentes de las capas de rodadura o subrasantes de las carreteras no pavimentadas, la cual es ocasionada por diversos agentes atmosféricos como el agua, el aire, el viento, el congelamiento, además del efecto de la abrasión ocasionada por el tráfico.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La capa de rodadura de la trocha carrozable considerada para el estudio se inicia en la localidad de La Serma hasta Tambillo pertenecientes al distrito de Bellavista provincia de Jaén, tramo la cual en la actualidad presenta inestabilidad a consecuencia de las lluvias en la zona, elevadas temperaturas, vientos, tráfico constante en el recorrido de la trocha carrozable.

Es por ello que en el desarrollo del proyecto de investigación se optó por hacer uso de Aditivo Sika Dust Seal con el fin de determinar la influencia que tendrá este en mejorar las propiedades mecánicas del suelo de la capa de rodadura de la trocha carrozable tramo la Serma – Tambillo; las cuales se realizaron mediante ensayos de mecánica de suelos en laboratorio.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cuál es la influencia del aditivo SIKA DUST SEAL en la estabilidad del suelo de la capa de rodadura en la Trocha Carrozable Tramo La Serma - Tambillo?

1.3. JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

El uso del aditivo tiene como finalidad mejorar las propiedades de los suelos, resultando así una alternativa de solución en la estabilización del suelo en la trocha carrozable de la zona de estudio. Anteriormente el material afirmado seleccionado y escaso en la zona fue el material principal para el respectivo mantenimiento. Pero al ser considerado en este estudio el innovador producto que se encarga de mejorar la estabilidad del suelo, resulta que es recomendable contribuir en la toma de decisiones acerca del uso del producto.

1.4. ALCANCES O DELIMITACION DE LA INVESTIGACION

Los resultados del presente trabajo de investigación están dirigidos a aquellos lectores o investigadores que se relacionen al tema de investigación, ya que se tiene un alcance referencial acerca del uso del aditivo Sika Dust Seal, el cual se encarga de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos del tipo A-2-4.

1.5. LIMITACIONES

La investigación se realizó en la localidad de Bellavista, en el tramo desde los anexos La Serma hasta Tambillo, donde para ello se tomaron muestras de las calicatas y se realizaron ensayos en laboratorio de suelos con el uso del aditivo Sika Dust Seal, donde se obtuvieron resultados favorables mediante ensayos de proctor modificado y relación de soporte - CBR.

1.6. OBJETIVOS

- Objetivo General

Determinar la influencia del uso del aditivo Sika Dust Seal en las propiedades Físico – Mecánicas del suelo de la capa de rodadura, del tramo en estudio.

- **Objetivos Específicos**

- Realizar el estudio de mecánica de suelos de la muestra patrón, clasificar el suelo y encontrar sus propiedades físicas (granulometría, límites de consistencia) y mecánicas mediante ensayos en laboratorio (proctor modificado, relación de soporte - CBR).
- Realizar el estudio de mecánicas de suelos con el uso del aditivo Sika Dust Seal con el fin de encontrar nuevas propiedades mecánicas a través de ensayos en laboratorio (proctor modificado, relación de soporte - CBR).
- Determinar la dosificación óptima de los componentes (Sika Dust Seal + Agua) a usar en laboratorio y posteriormente relacionarla con el campo para posteriores estudios.

1.7. HIPOTESIS

El uso del aditivo Sika Dust Seal mejora las propiedades Físico – Mecánicas del suelo de la superficie de rodadura de la vía no pavimentada en un 20%.

1.8. DEFINICION DE VARIABLES

Variable independiente

- Cantidad de aditivo Sika Dust Seal.

Variable dependiente

- Estabilidad del suelo de la capa de rodadura de la vía no pavimentada.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES TEORICOS DE LA INVESTIGACION

2.1.1. A NIVEL INTERNACIONAL

Solminihac, Echeverría, Thenoux, 2013, Santiago de Chile. En su investigación “Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos”, concluye que el aumento de la capacidad de soporte de un suelo aumenta en un 25% en arcillas utilizando cal, cemento y yeso.

Rojas & Camargo, 2004, Bucaramanga, Colombia. En su tesis “Estabilización físico – química de suelos finos para subrasantes de vías rurales”, concluye que en la evaluación de los agentes estabilizadores con base a la dosificación planteada, se determinó que el aditivo más eficaz corresponde al ion calcio (cal viva), el cual se encarga de disminuir la plasticidad de un 47% a un 5% y aumenta el CBR de 1.1% a un 24.5%.

Díaz & Mejía, 2004, Bucaramanga, Colombia. En su investigación “Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos”, con aditivo Stabtos (polvo estabilizante) concluyen que la capacidad de soporte del suelo se incrementa notablemente; igualmente reduce la expansión.

2.1.2. A NIVEL NACIONAL

Velarde, 2015, Puno, Puno. En su tesis de investigación “Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la determinación de la resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos estabilizados con cal y cemento”, concluye que los resultados de la investigación fueron satisfactorios pues la región propuesta como viable para establecer los porcentajes óptimos de cal y cemento logró obtener valores de la resistencia a la compresión simple elevados.

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, en la evaluación del comportamiento de pavimentos afirmados estabilizados con aditivos químicos como la cal, cemento, escorias, cloruros de sodio, cloruros de calcio, cloruros de magnesio; a un año de la ejecución de tramos experimentales de prueba en diferentes regiones del Perú. Concluye y recomienda lo siguiente:

- Que los tramos estabilizados soportaron las lluvias y el efecto abrasivo del tráfico, teniendo mejor comportamiento estructural con respecto al tramo patrón de referencia. Presentan mejores características físico - mecánicas con respecto al suelo no estabilizado, mejorando su capacidad de soporte, disminución de la permeabilidad y reducción significativa de la contaminación por expansión de polvo.
- Concluye que se aplicaron productos estabilizadores de suelos en los tramos experimentales conformado por gravas limo-arcillosas de baja a mediana plasticidad, los resultados son adecuados cuando se cumple las recomendaciones del productor, se caracterice los materiales sobre los cuales se aplicará el estabilizador, se realice un adecuado amasado, mezclado, compactado y curado durante la etapa constructiva, se asegure el correcto funcionamiento de los sistemas de drenaje y sub drenajes, y se conforme secciones transversales con bombeo no menor a 3%.

Consortio Supervisor Cochabamba, Cajamarca, 2011, menciona un antecedente importante en la ejecución de la carretera Chongoyape – Cochabamba – Cajamarca, Tramo: Llama – Cochabamba, que en su fase de ejecución se encontró una subrasante de mala calidad, de la cual se tuvo la necesidad de estabilizar el suelo con el insumo Cal Hidratada, dándose así con fecha 10 de Noviembre del 2011, el consorcio supervisor mediante anotación en asiento N° 245 del cuaderno de obra, solicita al contratista eliminar todo agregado grueso que contenga el suelo a estabilizar, así como eliminar los terrones grumosos que se formen durante el periodo de hidratación. En la misma fecha el consorcio Cajamarca mediante asiento N° 247 del cuaderno de obra, solicitó al supervisor que indique si la instrucción

contenida en el asiento N° 245, aprueba la propuesta formulada por éste, referida a la ejecución de los trabajos realizados de estabilización de suelo con cal en la subrasante entre los km 58+600 al km 70+300. Para el 26 de Noviembre de 2011, se informó aprobar mediante asiento N° 254 en cuaderno de obra la necesidad de aprobar y tramitar el presupuesto adicional de obra N° 07 para la ejecución de las partidas que involucran la estabilización del suelo con el insumo Cal Hidratada. (Resolución Ministerial 878-2011 MTC del Ministerio de Transportes y Comunicaciones).

2.2. BASES TEORICAS

2.2.1. ESTABILIZACION DE SUELOS

2.2.1.1. DEFINICIONES

Álvarez Pabón, 2010, indica que es el conjunto de procesos físicos y químicos que tienden a modificar las propiedades de los suelos que interesan para un determinado uso en la ingeniería, logrando como objetivo que la mezcla (material + estabilizante) sea el adecuado para cierto fin, reemplazando este a otros materiales no disponibles o más costosos.

Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito – MTC, 2008. Es el proceso que tiene por objeto mejorar la resistencia, durabilidad, insensibilidad al agua, estabilidad al uso constante, para así soportar las condiciones climáticas más severas. La estabilización puede ser granulométrica o mecánica, conformada por mezclas de dos o más suelos de diferentes características, de tal forma de obtener un suelo de mejor granulometría, plasticidad, permeabilidad o impermeabilidad.

2.2.2. TIPOS DE ESTABILIZACION DE SUELOS

2.2.2.1. ESTABILIZACION FISICA

Manual de Carreteras 2014, “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos” Sección Suelos y Pavimentos), indica que este tipo de estabilización se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Existen varios métodos y los más importantes son:

- **Mezclas de Suelos**

Este tipo de estabilización es de amplio uso pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las arenas gravosas tienen una alta fricción interna lo que les hace soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que el suelo sea estable, ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

- **Vibroflotación**

Carlos Fernández Loaiza, México, 1982. Indica que es el apisonamiento de los suelos vía vibradores y que también es conocido bajo el nombre de vibrocompactación. Es una técnica de estabilización de suelos granulares tales como la arena y las gravas. El método consiste en poner las partículas en suspensión por vibración, para que puedan reordenarse en un estado más compacto.

2.2.2.2. ESTABILIZACION QUÍMICA

Solminihaq, Echeverría, Thenoux, Santiago de Chile, 2013, indican que la estabilización química consiste en alterar las propiedades del suelo usando un cierto aditivo, el cual mezclado con el suelo, normalmente produce un cambio en las propiedades moleculares superficiales de los granos del suelo y en algunos casos pega los granos entre sí, de modo de producir un incremento en su resistencia.

La Norma Técnica de Estabilizadores Químicos MTC E 1109 – 2004, indica que la estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la

aplicación de productos químicos, el cual se debe mezclar homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a ser mejoradas, ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio.

El Manual de Carreteras “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”, 2014, Sección Suelos y Pavimentos, menciona que este tipo de estabilización principalmente se debe a la utilización de ciertas sustancias químicas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Dentro de los más usados se puede identificar los siguientes:

- **Cal:** Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- **Cemento Portland:** Aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- **Productos Asfálticos:** Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- **Cloruro de Sodio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- **Cloruro de Calcio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- **Escorias de Fundición:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- **Polímeros:** Se utiliza comúnmente en suelos con el fin de aumentar resistencia, mejorar la impermeabilización y prolongar su vida útil.

2.2.2.3. ESTABILIZACION MECÁNICA

Raúl A. Colombo, 2004, menciona que es el tipo de estabilización más importante ya que además de lograr por si misma algunas mejoras, acompaña a los demás tipos de estabilizaciones. Este tipo de estabilización

se logra aportando energía mecánica a la masa del suelo, para así obtener los mejores resultados, ya que se ha distribuido cargas uniformes en determinada capa. Para estabilizar el suelo mediante estos medios, se tiene que humedecer teniendo en cuenta que al porcentaje indicado por los ensayos se le debe adicionar lo necesario, debido a las pérdidas durante el laboreo (mezclado, evaporación, etc.) y la densificación se debe efectuar con el equipo de compactación adecuado al tipo de material.

Este tipo de estabilización se encarga de densificar el suelo y así lograr mejorarla considerablemente sin que se produzcan reacciones químicas de importancia. Los métodos de estabilización mecánica que más se utilizan es:

- **Compactación:** Proceso realizado generalmente por medios mecánicos por el cual se obliga a las partículas de suelo a ponerse más en contacto con otras, mediante la expulsión del aire de los poros, lo que implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, lo que produce en el suelo cambios de volumen de importancia, principalmente en el volumen de aire.

Chang, 2007, indica que la compactación es el proceso de empaquetamiento de las partículas de suelo más cercanamente posible por medios mecánicos aumentando así la densidad seca, donde se logra reducir la relación de vacíos.

Una de las ventajas de la compactación es que aumenta la resistencia y la capacidad de carga del suelo. Reduce la compresibilidad y disminuye la aptitud para absorber el agua. Reduce los asentamientos debido a la disminución de la relación de vacíos.

Así como existen ventajas también la compactación tiene desventajas, es así que la compactación muy intensa produce un material muy susceptible al agrietamiento. Aumenta el potencial de hinchamiento (con la humedad) en suelos finos y el potencial de expansión por las heladas (Trabajo de investigación en estabilización de suelos Universidad de la Costa Cuc).

2.2.3. MECANICA DE SUELOS

2.2.3.1. DEFINICIONES

- Karl Von Terzaghi, 1925, indica que la mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición química de las rocas, independientemente de que tengan o no materia orgánica.
- Crespo Villalaz, 2012, indica que es la disciplina que se ocupa de las propiedades, comportamiento y utilización del suelo como material estructural, de tal manera que las deformaciones y resistencia del suelo ofrezcan seguridad, durabilidad y estabilidad a las estructuras.

2.2.3.2. EL SUELO

2.2.3.2.1. DEFINICIONES

- Juárez Badillo, Rico Rodríguez, indican que son sedimentos no consolidados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad y que pueden tener materia orgánica.
- N. J. Chiossi, es el material resultante de la descomposición y desintegración de las rocas, consecuencia del ataque de agentes atmosféricos.
- El Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2012, indica que el suelo de fundación es el terreno conformado por suelo, roca o mezcla de ambos, cuya porción nivelada y compactada sirva de soporte a los pavimentos.

2.2.3.3. CLASIFICACION DE SUELOS

Juárez Badillo, Rico Rodríguez, México, 2005, mencionan que a la gran variedad de suelos que se encuentran en la corteza terrestre, la mecánica de suelos ha desarrollado diversos métodos de clasificación.

2.2.3.3.1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACION DE SUELOS (S.U.C.S)

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a la clasificación propuesta en 1942 para aeropuertos.

Tabla 01. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S)

DIVISION MAYOR		GRUPO SIMBOLOS	DESCRIPCION	CRITERIO DE CLASIFICACION DEL LABORATORIO			
SUELOS DE GRANO GRUESO Mas de la Mitad del material es mayor que el tamiz N° 200	GRAVAS	GW	Grava bien graduada o mezcla de arena y grava. Poco o ningun fino	Determinar el porcentaje de arena y grava de la curva granulométrica según el porcentaje de finos (fracción menor que el tamiz N° 200), los suelos de grano grueso y de grano fino se clasifican así: Menos del 5% GW, GP, SW, SP Más del 12% GM, GC, SM, SC 5% al 12% Caso límite usar los dos símbolos	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ mayor que 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \cdot D_{60})}$ entre 1 y 3		
			GP			Grava mal graduada o mezcla de arena y grava. Poco o ningun fino	No reúne los requisitos de granulometría para GW
		GM	d		Grava con limos, grava mal graduada muy limosa. Mezcla grava, arena y arcilla	Límites de Atterberg bajo la línea "A" o IP menor de 4	Por encima de la Línea "A" con IP entre 4 y 7, estaremos en un caso "límite" y usarse los dos símbolos
			u		Grava con limos, grava mal graduada muy limosa. Mezcla grava, arena y arcilla		
		GC	Mezcla bien graduada de grava, arena y arcilla. Excelente aglutinante		Límites de Atterberg sobre la línea "A" o IP mayor de 7		
		ARENAS	SW		SW	Arena bien graduada y arena gravillosa, poco o ningun fino	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ mayor que 6 $C_c = \frac{(D_{20})^2}{(D_{10} \cdot D_{60})}$ entre 1 y 3
	SP				Arena mal graduada, arena gravillosa, pocos o ningun fino	No reúne los requisitos de granulometría para SW	
	SM		d		Arena con limos, arena muy limosa, mezcla arena y arcilla	Límites de Atterberg bajo la línea "A" o IP menor de 4	Las líneas trazadas en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos límite y deben usarse los dos símbolos
			u		Arena con limos, arena muy limosa, mezcla arena y arcilla		
	SC		Mezcla bien graduada arena y arcilla. Excelente aglutinante		Límites de Atterberg sobre la línea "A" o IP mayor de 7		
	SUELOS DE GRANO FINO Mas de la mitad del material es menor que el tamiz N° 200		LIMO Y ARCILLA (Límite líquido es menor de 50)		ML	Limo inorgánico y arena muy fina, polvo de roca, arena fina con ligera plasticidad	<p>LINEA A: $I_p = 0.73(WL - 20)$</p>
	CL	Arcilla inorgánica de baja o media plasticidad. Arcilla arenosa, arcilla gravillosa, arcilla limsa, arcilla floja					
OL	Limos orgánicos, limos-arcilla orgánica de baja plasticidad						
LIMO Y ARCILLA (Límite líquido es mayor de 50)	MH	Limos inorgánicos, arena fina micáceos o diatomeas, suelo limoso, suelo elástico					
	CH	Arcilla inorgánica de alta plasticidad					
	OH	Arcilla orgánica de media a alta plasticidad					
SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS		Pt	Turbas y otros suelos altamente organicos				

Fuente: Clasificación de suelos/Juan Niemann Soto, 2005

- **SUELOS DE GRANO GRUESO**

En los suelos gruesos se encuentran las gravas (G) y las arenas (S) de tal modo que un suelo pertenece al grupo de las gravas (G) si más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla N° 04, y las arenas en el caso contrario.

Las gravas y las arenas se dividen en cuatro grupos (GW, GP, GM, GC) y (SW, SP, SM, SC), respectivamente. En el símbolo GW, el prefijo G se refiere a las gravas y W bien graduado. El símbolo GP indica gravas mal graduadas. El símbolo GM indica gravas limosas. El símbolo GC indica gravas arcillosas. Los símbolos SW, SP, SM y SC indican arenas bien graduadas, arenas mal graduadas, arenas limosas, arenas arcillosas respectivamente. Ver tabla 01.

- **SUELOS DE GRANO FINO**

SUCS considera tres grupos para los limos y las arcillas con límite líquido menor de 50%, en tres grupos para limos y arcillas con límite mayor de 50% y en un grupo para los suelos altamente orgánicos.

Si el límite líquido del suelo es menor de 50%, es decir, si el suelo es de compresibilidad baja o media, se añade el sufijo L (Baja plasticidad) a los prefijos M, C y O, dándose así los símbolos ML (Limo inorgánico de baja plasticidad), CL (Arcilla inorgánica de baja plasticidad) y OL (Limos orgánicos de baja plasticidad).

Si el límite líquido es mayor de 50%, es decir, si el suelo es de plasticidad alta, se añade al sufijo H (Alta plasticidad) a los prefijos M, C y O, obteniéndose así los símbolos MH (Limos orgánicos de alta plasticidad), CH (arcilla inorgánica de alta plasticidad) y OH (arcillas orgánicas de alta plasticidad). Ver tabla 01.

Los suelos altamente orgánicos como las turbas se designan con el símbolo Pt.

2.2.3.3.2. SISTEMA AASTHO

En 1929 nace uno de los sistemas de clasificación, el cual fue utilizado para evaluar suelos que conforman las carreteras, es así que nace en

1945 el sistema AASHO, pero que en la actualidad se le denomina AASHTO. Este tipo de sistema se encarga de clasificar los suelos en un total de 7 grupos, basándose en los ensayos de **Granulometría, límite líquido e índice de plasticidad**. A la vez estos se evalúan en un **índice de grupo**, el cual se calcula con la siguiente fórmula empírica:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(W_L - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Dónde:

F : Porcentaje que pasa el tamiz 0.08 mm (N° 200), expresado en números enteros.

W_L : Límite líquido.

IP : Índice de plasticidad.

Niemann Soto, 2005, indica que el índice de grupo se informa en números enteros y si es negativo su valor será igual a 0 (cero). El grupo en el que se clasifique, incluyendo el índice de grupo será utilizado para determinar la calidad relativa de suelos en terraplenes, materiales de subrasante, subbases y bases.

PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACION

Una vez obtenido los resultados en laboratorio y obtenidos de acuerdo a la tabla 02, se procede a clasificar el suelo. Todos los valores se aplican con números enteros, si algún dato presenta un número decimal este deberá aproximarse al entero más cercano.

El número del índice de grupo, debe ir siempre acompañado al símbolo del grupo, por ejemplo: Si el grupo de suelo es A-2-5 el índice de grupo es 4, este debe acompañarse mediante un paréntesis, resultando A-2-5 (4).

CONSIDERACIONES PARA EL PROCEDIMIENTO

- 1) Cuando se calcula índices de grupo de los subgrupos A-2-6 y A-2-7, use solamente el término de índice de plasticidad de la fórmula.
- 2) Cuando el suelo es no plástico o cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar (0).

- 3) Cuando un suelo es altamente orgánico, es decir que presenta un color oscuro, fibroso y olor putrefacto, este puede ser clasificado como A-8 solo con una inspección visual y sin considerar sus valores de límite líquido e índice de plasticidad así como tampoco el porcentaje que pasa el tamiz de abertura 0.08 mm (N° 200).

Tabla 02. Clasificación de materiales para subrasante de carreteras

CLASIFICACION GENERAL	MATERIALES GRANULARES (35% o menos del total de la muestra que pasa por tamiz N° 200)							MATERIALES LIMO - ARCILLOSOS (Mas de 35% pasa por tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
GRUPO	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Granulometría (% que pasa)												
N° 10	50 Max.											
N° 40	30 Max.	50 Max.	51 Min.									
N° 200	15 Max.	25 Max.	10 Max.	35 Max.	35 Max.	35 Max.	35 Max.	36 Min.	36 Min.	36 Min.	36 Min.	
Características de la fracción (pasa tamiz N° 40)												
Límite líquido				40 Max.	41 Min.	40 Max.	41 Min.	40 Max.	41 Min.	40 Max.	41 Min.	
Índice de plasticidad	6 Max.		NP	10 Max.	10 Max.	11 Min.	11 Min.	10 Max.	10 Max.	11 Min.	11 Min (1)	
Índice de grupo (2)	0		0	0		4 Max.		8 Max.	12 Max.	16 Max.	20 Max.	
Tipos de material más destacados como constituyentes	Fragmento de piedra, grava y arena		Arena fina	Limo o Arcilloso, grava y arena				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Calidad general como Sub - Base	EXCELENTE A BUENA						REGULAR O POBRE					

(1) Véase el índice de grupo en la fórmula por método de cálculo.- El índice de grupo deberá aparecer en paréntesis después del símbolo de grupo, así: A-2-6 (3), A-4-6, A-6-12, A-7-5 (17).

(2) El índice de plasticidad del Sub Grupo A-7-5 es: $IP < 0 = LL - 30$ / El índice de plasticidad del Sub Grupo A-7-6 es: $IP > LL - 30$

Fuente: Clasificación de suelos/Juan Niemann Soto, 2005

2.2.3.4. ENSAYOS EN MECANICA DE SUELOS

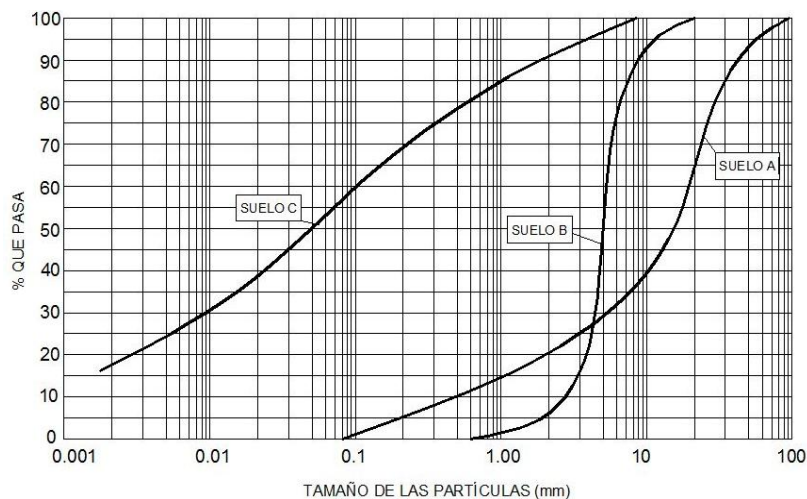
2.2.3.4.1. ANALISIS GRANULOMETRICO

Juárez Badillo, Rico Rodríguez, 2005, indica que es la medición que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, con el fin de ser analizados, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Análisis Mecánico del suelo.

Juárez Badillo, Rico Rodríguez, 2005, la muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes hasta la malla N° 200 (0.074 mm); los retenidos en cada malla se pesan y el porcentaje que presentan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño; el complemento al 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por la malla en cuestión. Así se puede obtener puntos en la curva acumulativa correspondiente a cada abertura. Este método se dificulta cuando las aberturas son pequeñas y por ejemplo, el cribado a través de las mallas N° 100 (0.149 mm) y N° 200 (0.074 mm) suele requerir agua para ayudar el paso de la muestra (procedimiento de lavado). Los tamaños menores de suelo exigen una investigación fundada en otros principios, uno de ellos el método del hidrómetro (densímetro), quizá uno de los más usados y el único que se ve con cierto grado de detalle.

Figura 01. Curvas granulométricas



Fuente: Juárez Badillo, Rico Rodríguez.

Un suelo constituido por partículas de un solo tamaño, es representado por una línea vertical; una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños (suelos heterogéneos, suelos bien granulados).

Tabla 03. Significado de curvas granulométricas (% que pasa Vs Tamaño de las partículas)

TIPO DE CURVA	DESCRIPCION
CURVA A	Suelo bien gradado y de grano grueso
CURVA B	Suelo mal gradado, poco uniforme
CURVA C	Suelo arcilloso o limoso

Fuente: Juárez Badillo, Rico Rodríguez.

Parámetros de clasificación de un suelo

Las curvas granulométricas se utilizan para obtener diferencias de los suelos. Es por ello que existen tres parámetros básicos que se usan para clasificar el suelo, los cuales son: Diámetro efectivo, coeficiente de uniformidad (C_u) o coeficiente de Hazen que nos indica la variación del tamaño de las partículas presentes en una muestra y el coeficiente de curvatura (C_c) que es una medida de la forma de la curva entre el D60 y D10 y si el valor es diferente de 1.0 nos indica que falta una serie de diámetros entre los tamaños correspondientes a D60 y D10 cuyos coeficientes dan la gradación del suelo.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad y \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})}$$

Dónde:

- C_u es el coeficiente de uniformidad.
- C_c es el coeficiente de curvatura.
- Los D_i con $i = 10, 30$ y 60 son los tamaños o diámetros de las partículas, para lo cual el i % del material es más fino que ese tamaño.

Un suelo es bien gradado cuando: $C_u > 4$ o 6 y $1 < C_c < 3$

Juárez Badillo, Rico Rodríguez, 2005, cuanto más alto sea el coeficiente de uniformidad mayor será el rango de los tamaños del suelo.

El diámetro en la curva de distribución de tamaños de las partículas correspondientes al 10% de finos, se define como diámetro efectivo o D_{10} .

2.2.3.4.2. LIMITES DE ATTERBERG (Consistencia de los Suelos).

Juárez Badillo, Rico Rodríguez, 2005, en Mecánica de suelos estos ensayos de identificación, es conocer cualitativamente desde el punto de vista de la consistencia, el comportamiento de un suelo dado en función de su humedad. Además de ello nos permite obtener una información cuantitativa del cambio de volumen que puede experimentar un suelo ante variaciones de temperatura.

De ello surge el término plasticidad, el cual es definido como la propiedad de algunos suelos capaz de deformarse sin obtener agrietamiento alguno. La plasticidad de los suelos cohesivos no es una propiedad permanente, sino eventual y dependiente de su contenido de agua. Por ejemplo una arcilla bastante seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, pero a la vez con gran contenido de agua.

Crespo, 2004, indica que la plasticidad es la propiedad que presentan los suelos para deformarse hasta cierto límite, sin romperse.

Estados de consistencia de los suelos.

Según su contenido de agua, un suelo puede estar en cualquiera de los estados de consistencia siguientes:

- Estado Líquido (apariencia en suspensión).
- Estado semilíquido (apariencia de fluido viscoso)
- Estado plástico (comportamiento plástico).
- Estado semisólido (apariencia sólida, a temperaturas altas disminuye su volumen).
- Estado sólido (el volumen no varía con el secado).

Límites de plasticidad.

a). Límite Líquido (LL)

Humedad de un suelo que pasa del estado semilíquido a plástico.

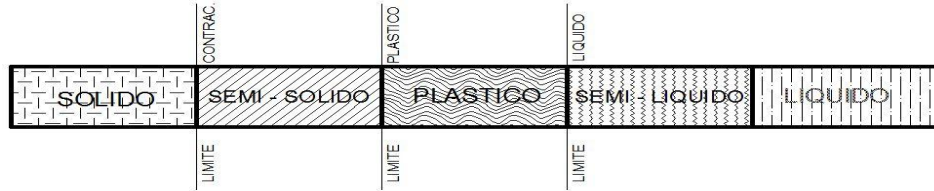
b). Límite Plástico (LP)

Humedad del suelo que pasa del plástico al semisólido.

c). Límite de contracción o retracción (LC)

Humedad del suelo que pasa del estado semisólido al sólido.

Figura 02. Estados de un suelo



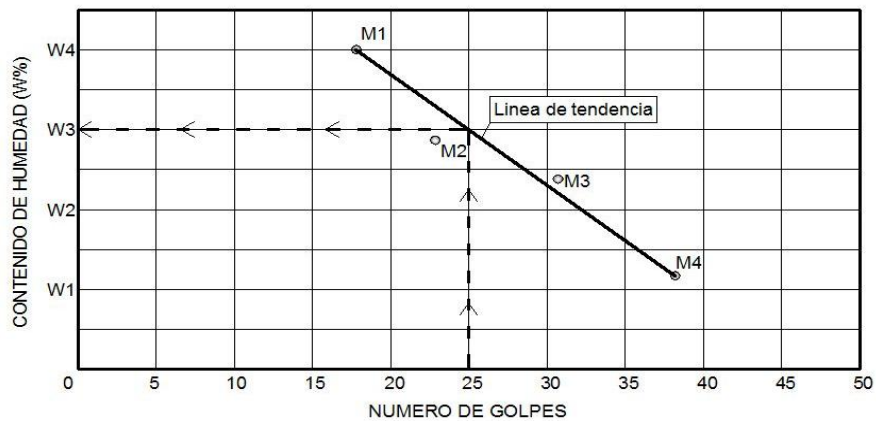
Fuente: Crespo Villaláz, 2004.

Determinación del Límite Líquido

Juárez Badillo, Rico Rodríguez 2005, el objetivo es determinar el contenido de agua de un suelo, por lo cual se emplea la copa de casagrande, el cual es una copa de bronce, en la cual se coloca una pasta de suelo hasta una cierta altura y se hace que la copa caiga periódicamente hasta golpear la base. El suelo contenido en la copa será ranurado mediante un acanalador. La altura de caída es de 1 cm.

El contenido de agua que tiene el suelo cuando se cierra la ranura en el fondo de la copa cuando se le haya dado 25 golpes, corresponde al valor para el límite líquido. Para encontrar este contenido de humedad según los 25 golpes, se realiza el ensayo varias veces con pastas de diferentes consistencias, luego se ubica en el gráfico para hallar el valor buscado.

Figura 03. Cálculo de Humedad de un suelo (N° golpes Vs Humedad %) – Límite Líquido.



Fuente: Elaboración propia, basada en Ensayos de laboratorio.

Determinación del Límite Plástico

Juárez Badillo, Rico Rodríguez 2005, indica que es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, donde el suelo cambia de estado plástico a semisólido. El contenido de agua de la muestra está definido como aquel donde el suelo, después de dejarse moldear hasta alcanzar rollitos de 3.2 mm de diámetro, se empieza a romper en pequeñas piezas. Para ello se utiliza un aproximado de 100 gr de suelo que pasa la malla N° 40, previamente secada al aire. Para calcular la humedad se utiliza la siguiente formula:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde:

W_w : Peso del agua presente en la muestra. Se calcula mediante la diferencia entre el peso de la muestra húmeda y el peso de la muestra seca.

W_s : Peso de la muestra seca.

2.2.3.4.3. ENSAYO PROCTOR

Juárez Badillo, Rico Rodríguez 2005, las relaciones que existen entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo fueron establecidos por R. Proctor en 1933, en lo que luego se le denominaría la prueba de compactación proctor estándar y 15 años más tarde, conforme aumentaban las cargas vehiculares, se denominó la prueba de compactación proctor modificado. El objetivo de esta prueba es determinar la correcta cantidad de agua de amasado a usar en un suelo y el grado de compacidad que puede esperarse al compactar el suelo a esa humedad óptima.

Chang, 2007, menciona que la compactación es el proceso de empaquetamiento de las partículas de suelo más cercanamente posibles por medios mecánicos aumentando la densidad seca, donde se logra reducir la relación de vacíos, reducción del contenido de agua. Los vacíos no pueden eliminarse por compactación, solo se reducen al mínimo.

Braja, 2010, indica que para realizar la compactación se realizan pruebas estándar de laboratorio usadas para evaluar los pesos específicos secos máximos y los contenidos óptimos de agua para varios suelos, estos son la prueba proctor estándar y prueba proctor modificada.

Proctor Modificado.

Esta prueba consistió en compactar el suelo en 5 capas dentro de un molde de dimensiones y forma especificada, por medio de 25 o 56 golpes, usando para ello un pisón también especificado (4.5 kg), que se deja caer libremente desde una altura fijada (18") y repartidos en el área del molde. La energía específica de compactación es de 27.2 kg cm/cm³ calculada con la siguiente formula:

$$E_c = \frac{(N * n * W * h)}{V}$$

Dónde:

- Ec : Energía Especifica.
- N : Número de golpes por capa.
- n : Número de capas de suelo.
- W : Peso del pisón.
- h : Altura de caída libre del pisón.
- V : Volumen del suelo compactado.

2.2.3.4.4. VALOR DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

Hernández, 2008, indica que el objetivo de este ensayo es determinar la capacidad de soporte de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables, con el cual se ha tratado de medir la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidades controladas, permitiendo así obtener un porcentaje de la relación de soporte. Este ensayo se desarrolló por parte de la división de carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación y evaluación de la capacidad de un suelo para ser utilizado

como sub-base o material de base en construcciones de carreteras y aeropuertos.

La siguiente tabla nos da una clasificación típica para infraestructura de pavimentos:

Tabla 04. Usos de materiales de acuerdo al CBR

CBR	CLASIFICACION GENERAL	USOS	SISTEMA DE CLASIFICACION	
			SUCS	AASHTO
0 - 3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3 - 7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7 - 20	Regular	Sub - base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Base, sub - base	GM, GC, W, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1-a, A2-4, A3

Fuente: Carlos Crespo Villalaz, 2004.

a) Procedimiento de prueba

- Tamaño del material.

Norma técnica peruana 339.145, indica que el material deberá pasar la malla 19.05 mm (3/4") y el material retenido en la malla 4.76 mm (N°4). El material retenido en la 3/4" será remplazado con el mismo peso por otro material comprendido entre la 3/4" y la malla N° 04.

- Compactación.

Norma técnica peruana 339.145, indica que se debe determinar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca mediante el procedimiento de proctor modificado, sin embargo será aplicada para este propósito en otro tipo de molde (molde CBR) y el pisón grande (10 libras con altura de caída de 50 cm máximo). La muestra será compactada en 5 capas con 12, 25 y 56 golpes por capa. Una vez hallado el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca, será compactada según el mismo método más muestras.

Luego colocar sobrecargas encima de la muestra, es necesario emplear un disco espaciador con espesor de 5 cm. En esta muestra se controlará

el contenido de humedad sacando porciones de la parte superior e inferior y remplazándolas.

- **Sobrecarga**

Norma técnica peruana 339.145, se aplica una sobrecarga que actúa con la misma presión de contacto como lo haría una capa de pavimento colocada encima de la base, subbase, subrasante.

- **Penetración**

Norma técnica peruana 339.145, indica que una vez que la muestra este compactada y preparada con sobrecargas se someterá a la prueba de penetración, aplicando un pistón (diámetro de 2") cuya velocidad de penetración sea aproximadamente de 0.05" (1.27 mm) por minuto y así obtener lecturas de cargas a las siguientes penetraciones: 0.025 pulgadas (0.635 mm), 0.050 pulgadas (1.270 mm), 0.075 pulgadas (1.905 mm), 0.100 pulgadas (2.540 mm), 0.200 pulgadas (5.080 mm), 0.300 pulgadas (7.620 mm), 0.400 pulgadas (10.16 mm), 0.500 pulgadas (12.70 mm).

- **Cálculo del índice de CBR**

Norma Técnica Peruana 339.145, indica que el índice de CBR se obtiene como la relación de carga unitaria en kg/cm² (lb/pulg²) necesarias para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (área de 20.27 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturada y dada en porcentaje, para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{CBR} = 100 * \frac{\text{Carga unitaria de ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}}$$

Los valores de carga unitaria que se deben usar en la fórmula son:

Tabla 05. Cargas Unitarias patrón - CBR

PENETRACION		CARGA UNITARIA PATRON	
mm	Pulg.	Kg/cm ²	Lb/pulg ²
2.54	0.1	70.00	1000
5.08	0.2	105.00	1500
7.62	0.3	133.00	1900
10.16	0.4	162.00	2300
12.70	0.5	183.00	2600

Fuente: Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Carlos Crespo Villalaz, 2004.

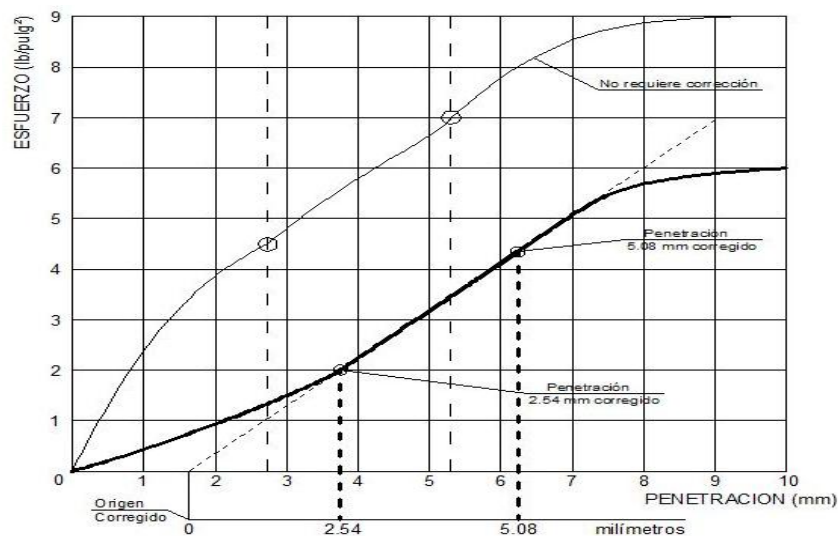
El índice de CBR se basa en la relación de carga para una penetración de 2.54 mm (0.1”), sin embargo, si el valor del CBR para una penetración de 5.08 mm (0.2”) es mayor, dicho valor debe aceptarse como valor final de CBR.

Curva: Esfuerzo – Penetración

Crespo Villalaz, México, 2004, se calculará la penetración aplicada dividiendo la carga entre el área del pistón y luego dibujar la curva esfuerzo penetración.

La curva ocasionalmente puede tomar la forma cóncava hacia arriba debido a las irregularidades de la superficie. En dichos casos el punto cero debe corregirse trazando una recta tangente a la mayor pendiente de la curva y trasladando el origen al punto en que la tangente corta la abscisa (Ver figura 04).

Figura 04. Curva esfuerzo Vs penetración (Corrección de origen)



Fuente: Mecánica de suelos y cimentaciones, Crespo Villalaz, 2004.

Consideraciones:

- Para suelos del tipo A-1, A-2-4 y A-2-6, la razón de soporte se calcula solo para 5 mm de penetración (0.2”).
- Para suelos del tipo A-4, A-5, A-6 y A-7, cuando la razón correspondiente a 5 mm es mayor que a 2.5 mm, confirmar el resultado, en caso de persistencia, la razón de soporte corresponderá a 5 mm de penetración.
- Para suelos tipo A-3, A-2-5 y A-2-7, el procedimiento a aplicar queda a criterio del ingeniero. Con el resultado del CBR se puede clasificar al suelo usando la tabla siguiente:

Tabla 06. Usos de material según CBR

CBR	CLASIFICACION
0 – 5	Subrasante muy mala
5 – 10	Subrasante mala
10 – 20	Subrasante regular a buena
20 – 30	Subrasante muy buena
30 – 50	Sub base buena
50 – 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

Fuente: Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Carlos Crespo Villalaz, 2004.

2.2.4. ESTABILIZACION DE SUELOS CON SIKA DUST SEAL

2.2.4.1. SIKA DUST SEAL

Hoja Técnica Sika Dust Seal PE, 2014, indica que es un compuesto a base de biopolímeros de origen natural con excelentes propiedades aglomerantes destinadas al control del polvo, estabilidad en caminos no pavimentados y otras áreas sujetas a la emisión de material particulado. Este producto posee propiedades para estabilizar el suelo produciendo una superficie resistente y durable, ya que puede ser utilizado también como protector contra la erosión en zonas rurales y desérticas. Para ver la hoja técnica del producto ver en Anexo N° 43.

2.2.4.2. DATOS EXPERIMENTALES

Tabla 07. Datos experimentales del uso de aditivo Sika Dust Seal

CLASIFICACION DEL SUELO	PRIMERA APLICACIÓN (LT/M ²)	APLICACIÓN PARA MANTENIMIENTO
Supresión de polvo plástico	0.25 – 0.50	0.15 – 0.25
Supresión de polvo levemente plástico o no plástico	0.50 – 0.80	0.25 – 0.40
Principalmente estabilización de suelo	0.80 – 1.60	0.30 – 0.50

Fuente: Ficha técnica Sika Dust Seal

2.2.5. PROPIEDADES DE UN SUELO ESTABILIZADO

2.2.5.1. Resistencia

Copado Beltrán, 2011, Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de pavimentos en la colonia San Juan Capistrano de Ciudad Oregón, indica que es la propiedad o capacidad de los suelos a soportar cargas y así conservar su estabilidad. Algunas de las formas de lograr una buena resistencia son las siguientes actividades:

- Estabilización mecánica.
- Estabilización química.
- Compactación.
- Vibro flotación.

2.2.5.2. Durabilidad

Revista ARQHYS, 2012, Durabilidad del Suelo, indica que es la resistencia al intemperismo, la erosión, la abrasión del tráfico; son los fenómenos a la que está expuesta una superficie terrestre, de esta manera los problemas de durabilidad suelen estar muy asociados a los suelos a nivel de capa de rodadura. Estos fenómenos pueden afectar tanto a los suelos naturales como a los estabilizados. Esto sucede a la mala elección del estabilizador y la mala dosificación.

2.2.5.3. Estabilidad Volumétrica

Copado Beltrán, 2011, Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de pavimentos en la colonia San Juan Capistrano de Ciudad Oregón, indica que este tipo de estabilidad se refiere a los suelos netamente expansivos, debido al cambio de humedad. Es por ello que se trata de transformar la masa de arcilla expansiva en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes como para resistir las presiones internas de expansión.

2.2.5.4. Permeabilidad

Lambe & Whitman, Mecánica de suelos, México. La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado.

Es importante indicar que no es muy difícil modificar la permeabilidad de los suelos, existen diversos métodos para reducir la permeabilidad los cuales son compactación, inyecciones y otros.

2.2.5.5. Compresibilidad

Copado Beltrán, 2011, Estabilización de un suelo arcilloso con cal hidratada, para ser utilizada como capa subrasante de pavimentos en la colonia San Juan Capistrano de Ciudad Oregón. Su valor nos indica que es el grado en que una masa de suelo sufre una alteración disminuyendo su volumen bajo efectos de cargas. La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad. Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles. Si se comprime una masa húmeda de estos materiales no se produce ningún cambio significativo en su volumen; lo que al contrario las arcillas si son netamente compresibles. Por lo que es fundamental que en los estudios se reduzca el valor de la compresibilidad al mínimo.

CAPITULO III. MATERIALES Y METODOS

3.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACION

3.1.1. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y METODO DE INVESTIGACION

Tipo de Investigación

Experimental, a través de estudios en laboratorio.

Nivel de Investigación

Aplicativo, ya que se planteó resolver un problema.

Diseño

Para el estudio se determinó la influencia que tuvo el uso del aditivo en la estabilidad de la capa de rodadura de la trocha carrozable, se realizó el cálculo de diversas dosificaciones (Aditivo + Agua) para ser usadas en los ensayos de laboratorio de suelos y ser transmitidas en campo.

Método de Investigación

En el desarrollo de la investigación, se consideró la siguiente metodología:

- 1) Se planteó el problema.
- 2) Se recopiló información, relacionada al problema.
- 3) Se realizaron ensayos de mecánica de suelos en laboratorio con las muestras obtenidas en campo, sin adición del aditivo, para así conocer sus propiedades.
- 4) Se realizaron los ensayos de mecánica de suelos respectivos en laboratorio con las muestras obtenidas, adicionando el aditivo estabilizador con el fin de mejorar sus propiedades tanto físicas como mecánicas.
- 5) Se evaluó e interpretó los resultados obtenidos.

Se recopiló información acerca de la tecnología del producto hecho a base de polímeros biodegradables (Sika Dust Seal). En la fase de investigación de este producto se identificó algunos datos experimentales acerca del uso del

aditivo. En la tabla N° 07. Datos Experimentales del uso de aditivo Sika Dust Seal, del subtítulo 2.2.4.2 se muestran algunos datos experimentales obtenidos, de los cuales se asumió como base para este estudio.

Las muestras se obtuvieron en campo, se realizó una calicata por kilómetro a una profundidad mínima de 1.50 m, en base al cuadro 4.1. Número de calicatas para exploración de suelos, del Manual de Carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos – sección suelos y pavimentos, 2013. Para ver el cuadro, ir al anexo N° 42.

Posteriormente se realizaron los ensayos en laboratorio de mecánica de suelos, con las muestras obtenidas en campo y de la siguiente manera:

- Ensayos en laboratorio con las muestras de suelo obtenidas sin adicionar el aditivo, donde se determinó las propiedades principales de los suelos.

Los ensayos y pruebas que se realizaron son:

CARACTERISTICAS FÍSICAS DEL SUELO

- Análisis granulométrico. (NTP 339.128, ASTM D422).
- Límites de consistencia o Límites de Atterberg (NTP 339.129, ASTM D4318).

CLASIFICACION DEL SUELO

- Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS, ASTM D2487).
- Sistema AASHTO (AASHTO, ASTM D3282).

PROPIEDADES DE DESEMPEÑO

- Ensayo proctor modificado (NTP 339.141, ASTM D1557).
 - Valor de soporte: Ensayo CBR (NTP 339.145, ASTM D1883).
- Seguidamente se realizaron los ensayos en laboratorio con la mezcla obtenida del material de las calicatas de estudio y el aditivo Sika Dust Seal, según proporciones calculadas. Los ensayos que se realizaron son:

PROPIEDADES DE DESEMPEÑO

- Ensayo proctor modificado, mezcla suelo - aditivo.
 - Valor de soporte: Ensayo CBR (California Bearing Ratio), mezcla suelo - aditivo.
- Se obtuvieron los resultados, se compararon resultados, se analizó, se discutió y se eligió la mejor alternativa para la solución al problema.

Los materiales que se utilizaron para el estudio son: Muestras de suelos obtenidos de las calicatas realizadas en la trocha carrozable y material de la superficie de la vía, Aditivo Sika Dust Seal, Agua, etc. Los ensayos de Mecánica de suelos se realizaron en el Laboratorio de Suelos TECNISU F&F S.R.L – Técnicos en Ingeniería de Suelos, conjuntamente con el Técnico Laboratorista.

3.1.2. UNIDAD DE ANALISIS

La unidad de análisis que se utilizó, fueron las calicatas que se realizaron en campo correspondientes al tramo en estudio.

3.1.3. POBLACION DE ESTUDIO

Se consideró como población de estudio las trochas carrozables que se encuentran en el territorio del distrito de Bellavista, en la provincia de Jaén, de la región Cajamarca.

3.1.4. MUESTRA

La muestra del estudio fue la trocha carrozable, tramo desde el anexo La Serma hasta Tambillo, donde para se realizaron calicatas a 1.50 m de profundidad. Se tomaron muestras de suelo a diversas profundidades, ya que el objetivo del estudio fue mejorar la capa de rodadura. Para ello ver perfiles estratigráficos en planos que se muestran en anexos. A continuación se muestra la exploración de la calicata C-02 realizada.

Fotografía 01. Fotografía de Calicata C-02



Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. UBICACION DEL PROYECTO

El área de desarrollo de la investigación se ubica entre las localidades de La Serma – Sambimera – Tambillo pertenecientes al distrito de Bellavista, provincia de Jaén.

El clima es cálido. Las precipitaciones en la localidad superan los 85 mm/mes, con precipitaciones incluso durante el mes más seco.

Para llegar a la zona de estudio se parte desde la Ciudad de Jaén, de la siguiente manera:

Tabla 08. Accesos a la zona de estudio

DESDE	HASTA	TIEMPO	DISTANCIA	TIPO CAMINO	TRANSPORTE
JAEN	CRUCE SHANANGO	00:15'	8.70 Km	Carretera asfaltada	Vehículos ligeros y pesados
CRUCE SHANANGO	BELLAVISTA	00:10'	7.60 Km	Carretera asfaltada	Vehículos ligeros y pesados
BELLAVISTA	INICIO ZONA DE ESTUDIO	00:05'	0.40 Km	Carretera asfaltada	Vehículos ligeros y pesados

Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio se realizó 04 calicatas (para ver la ubicación de las calicatas ver planos P-01, P-02, P-03 y P-UL en Anexos).

En la tabla N° 09 se presenta la ubicación de las calicatas ejecutadas, las cuales se ejecutaron en el tramo de la vía a una profundidad promedio de 1.50m.

3.1.6. EXPLORACION DE CAMPO

Con el objetivo de determinar las características físico - mecánicas de los materiales de la capa de rodadura se llevaron a cabo investigaciones mediante la ejecución de calicatas de 1.50 m de profundidad.

Las calicatas se ubicaron en la longitud de la carretera, dentro de la faja que cubre el ancho de la calzada, para determinar la cantidad de calicatas se acudió al Cuadro N° 4.1. Número de calicatas para exploración de suelos, del “Manual de Carreteras, Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos - MTC”, donde indica que para carreteras de Bajo Volumen de Transito con un IMDA ≤ 200 veh/día, de una calzada, menciona que se realizará 01 calicata/kilometro.

Tabla 09. Ubicación de calicatas exploradas

CAL. N°	PROGR.	COORDENADAS UTM			PROF. (m)
		ESTE	NORTE	COTA (m)	
C - 1	KM 0+000	761705.4852	9377214.7651	422.45	1.50
C - 2	KM 1+000	762144.3744	9378050.4748	421.10	1.50
C - 3	KM 2+000	762493.9307	9378969.6783	419.78	1.50
C - 4	KM 3+000	763108.4945	9379694.7746	418.82	1.50

Fuente: Elaboración propia.

3.1.7. MTC E 106/NTP 339.089. OBTENCIÓN EN LABORATORIO DE MUESTRAS REPRESENTATIVAS (CUARTEO).

La muestra se secó al aire libre, extendiéndola sobre una superficie plana y horizontal. Seguidamente se procedió a desmenuzar el material que contenía grumos.

Luego se mezcló bien hasta formar un cono, donde se repitió esta acción hasta cuatro veces. Posteriormente se dividió la mezcla en cuatro partes hasta obtener la cantidad requerida, es importante indicar que no se realizó

secado en horno o estufa, debido a que el uso de esto puede influir en los resultados.

El método del cuarteo se realizó con el fin de obtener una muestra representativa hasta llegar a la cantidad requerida para el ensayo de granulometría y límites de consistencia, entre otros según indican las normas.

En la fotografía N° 02 se presenta el método del cuarteo de la muestra obtenida en campo de la calicata C-01, el cual se utilizará para realizar los ensayos de granulometría y límites de consistencia.

Fotografía 02. Método del cuarteo de muestras Calicata C-01



Fuente: Elaboración propia.

3.1.8. MTC E 204/ NTP 339.128. MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Este ensayo consistió en la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de los suelos encontrados. En este ensayo se utilizó aproximadamente 1,500.00 gramos de suelo por cada calicata.

En la Fotografía N° 03 se presenta el ensayo realizado en laboratorio, el cual fue ensayado por diversos tamices estandarizados y normados por la ASTM, se puede observar el pesaje del material retenido en cada tamiz.

Fotografía 03. Análisis Granulométrico por tamizado Calicata C-02



Fuente: Elaboración propia.

3.1.9. MTC E 110/MTC E 111/NTP 339.129. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS.

El límite líquido, se determinó a través de pruebas en las cuales se esparció una porción de la muestra en una copa de bronce, dividida en dos por un ranurador, una vez observado que la muestra a fluido debido a los impactos causados por las repetidas caídas de la copa en un dispositivo mecánico estándar, se realizó el registro de los golpes resultantes. Para ello se realizó tres pruebas sobre un rango de contenidos de humedad. Seguidamente se graficó y calculó la información de las pruebas donde se estableció una relación a partir de la cual se determinó el límite líquido.

El límite plástico, se determinó presionando y enrollando el material aproximadamente 20 gramos alternadamente, haciendo forma a un rollo de 3.2 mm de diámetro (1/4 pulg), hasta que su contenido de humedad se reduzca hasta el punto en que el rollo se quiebre o aparezcan fisuras. El contenido de humedad del suelo en este punto descrito se reportó como el límite plástico.

En las fotografías N° 04 y N° 05 se presenta el ensayo en laboratorio para determinar el Límite Líquido y Límite Plástico del suelo de la Calicata C-03.

Fotografía 04. Ensayo Límite Líquido Calicata C - 03.



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía 05. Ensayo Límite Plástico Calicata C - 03.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.10. NTP 339.134. METODO DE CLASIFICACION DE SUELOS CON PROPOSITOS DE INGENIERIA (SUCS).

Para este método de clasificación, se tuvo en cuenta la determinación en laboratorio de las características de granulometría, límite líquido y límite plástico, donde así se llegó a determinar la clasificación del material.

Las diversas agrupaciones de este sistema de clasificación, sirvió para correlacionar en forma general los diversos tipos de suelos con su comportamiento dentro del campo de la ingeniería.

Para la clasificación del suelo se hizo el uso de la Tabla 01. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S), el cual se muestra en el subtítulo 2.2.3.3.1. Para ver resultados de la clasificación del suelo mediante el sistema SUCS, ver anexo N° 09.

3.1.11. NTP 339.135. METODO DE CLASIFICACION DE SUELOS PARA USOS EN VIAS DE TRANSPORTE (AASHTO).

El suelo por este método se divide en siete grupos. Para ello nos basamos en los resultados determinados en laboratorio acerca de la distribución del tamaño de partículas, y la consistencia del suelo. Este método es más preciso para nuestro estudio, es por ello que se utilizó para clasificar el material, ya que el propósito es con fines de construcción de carreteras. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo fue realizado por medio de un índice de grupo, el cual es un valor que se calculó, donde para ello se utilizó una fórmula empírica, la cual está mencionada en el subtítulo 2.2.3.3.2. SISTEMA AASHTO. Para ver resultados de la clasificación del suelo por este método ver anexo N° 09.

Para la clasificación del suelo con este método se hizo uso de la Tabla 02. Clasificación de materiales para subrasante de carreteras, el cual se muestra en el subtítulo 2.2.3.3.2. SISTEMA AASHTO.

3.1.12. MTC E 115/NTP 339.141. METODO DE ENSAYO PARA LA COMPACTACION DEL SUELO EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGIA MODIFICADA – PROCTOR MODIFICADO.

Este método de ensayo de compactación en laboratorio, se utilizó para determinar las relaciones entre el contenido de agua (contenido óptimo de humedad) y el peso unitario seco de los suelos (densidad seca máxima), las cuales se determinaron mediante una gráfica (curva de compactación).

Para este ensayo se utilizó aproximadamente 24 kg de suelo que fueron divididas para cuatro pruebas en cuatro moldes proctor. El material se tamizó por las mallas 3/4" (19.05 mm) y la N° 04 (4.76 mm). El material fue compactado en un molde de diámetro de 6 pulgadas (15.24 cm), altura de 4.59 pulgadas (11.64 cm) y con un pisón de 4.5 kg (10 libras) que se hizo caer a una altura de 18 pulgadas (45.72 cm), produciéndose así un esfuerzo de compactación de 27.2 kg cm/cm³.

Para este ensayo existen tres procedimientos, según el siguiente cuadro:

Tabla 10. Determinación procedimiento de ensayo Proctor Modificado

PORCENTAJE RETENIDO ACUMULADO (%)			
ESPECIFICACION	PROCESO A	PROCESO B	PROCESO C
Tamiz 3/4"	-----	-----	≤ 30%
Tamiz 3/8"	-----	≤ 20%	> 20%
Tamiz N° 04	≤ 20%	> 20%	-----
Diámetro Molde	4 pulg.	4 pulg.	6 pulg.
N° de capas	5	5	5
N° golpes/capa	25	25	56
Peso del martillo	10 lb ó 4.5kg	10 lb ó 4.5kg	10 lb ó 4.5kg
Altura de caída	18 pulg.	18 pulg.	18 pulg.
Cantidad material	6 kg	6 kg	6 kg
Usar material que pasa	N° 04	3/8"	3/4"

Fuente: Norma NTP 339.141.

Para nuestro ensayo proctor modificado se utilizó el procedimiento C.

Resumen del Ensayo.

Se colocó el suelo a diversos contenidos de humedad (% de agua) calculadas según el porcentaje en peso de cada muestra para cada molde ensayado, como para cada muestra o molde proctor se utilizó aproximadamente 6 kg de suelo, se tomó las siguientes referencias de humedades para la calicata C-01: para el molde 1A se mezcló al suelo con 2% de agua (120 cm³), para el molde 2A se añadió 4% de agua (240 cm³), para el molde 3A se añadió 6% de agua (360 cm³) y para el molde 4A se añadió 8% de agua (480 cm³).

Seguidamente, el material mezclado es distribuido en cinco partes para luego ser compactadas en 5 capas con 56 golpes por capa dentro de cada molde proctor.

La diferencia de agua que se añadió para cada molde es para encontrar el peso unitario seco resultante (densidad seca máxima) y el contenido de agua (contenido óptimo de humedad). Luego los datos obtenidos se representaron en una gráfica (curva de compactación), donde se representó en el eje de las abscisas los contenidos de humedad y en el eje de las ordenadas las diversas densidades secas.

En la fotografía 06, se puede apreciar el ensayo proctor modificado, donde se está preparando el molde 1A, el cual se le adicionó el 2% de humedad. En este ensayo se compactó con 56 golpes cada capa.

Fotografía 06. Ensayo Proctor Modificado Calicata C - 01.



Fuente: Elaboración propia.

En los anexos N° 10, 11, 12 y 13 se presenta el procedimiento y los datos obtenidos del ensayo proctor modificado realizados en laboratorio.

Importancia y Uso

El suelo que es tomado como relleno en ingeniería (terraplenes, rellenos de cimentación, bases para caminos) se compacta a un estado denso para obtener propiedades satisfactorias de ingeniería tales como, capacidad de soporte, resistencia al esfuerzo de corte, compresibilidad y permeabilidad.

Es por ello que los suelos son compactados generalmente para mejorar sus propiedades de ingeniería. Los ensayos de compactación en laboratorio proporcionan las bases para determinar el grado de compactación y el contenido de agua que se necesita para obtener las propiedades de ingeniería requerida.

3.1.13. MTC E 132/ NTP 339.145. METODO DE ENSAYO DE CBR (RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA) DE SUELOS COMPACTADOS EN LABORATORIO.

Este método de ensayo se usó para evaluar la resistencia de la capa de rodadura y del material existente en la trocha carrozable en estudio, el valor del CBR fue obtenido en laboratorio de suelos.

Herramientas y Aparatos.

- ✓ **MAQUINA DE CARGA:** Este aparato que se utilizó está equipado con un cabezal movable o base que corre a una velocidad uniforme de 1.27 mm/min (0.05 pulg/min) para ser utilizado en la penetración del pistón en el espécimen. En la fotografía 07 se puede observar la máquina de carga utilizada para este ensayo.

Fotografía 07. Máquina de carga para realizar ensayo CBR



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ **MOLDE:** El molde que se utilizó fue un cilindro metálico firme de un diámetro interno de 6 pulgadas (15.24 cm) y una altura de 12.57 cm. Este molde estuvo provisto de un collarín de extensión metálico de por lo menos de 50.8 mm (2.00 pulg) de altura y una placa base de metal con 28 agujeros de diámetro de 1.59 mm (1/16 pulg) uniformemente espaciadas en la placa dentro de la circunferencia interior del molde.

En la fotografía 08 se puede observar el ensayo de la Calicata 02 (con 25 golpes en 5 capas) ya preparado y pesado en balanza electrónica.

Fotografía 08. Moldes para el ensayo CBR de la calicata C-02.



Fuente: Elaboración propia.

- ✓ **DISCO ESPACIADOR:** El disco espaciador circular metálico que se utilizó tiene un diámetro de 15.08 cm y una altura de 6.14 cm.
- ✓ **APISONADOR:** Se utilizó el mismo apisonador que se usó para el ensayo proctor modificado.
- ✓ **APARATO PARA MEDIR LA EXPANSIÓN:** Se utilizó para medir la expansión cuando el suelo es cohesivo, se utilizó un vástago de metal ajustable y perforado a una placa de metal, la placa perforada tiene un diámetro de 15 cm y tiene veinte ocho agujeros de 0.16 cm uniformemente espaciados en la placa. También se usó un trípode metálico para apoyar el dial y así poder registrar la expansión durante el remejo.

- ✓ PESAS: Las pesas metálicas anulares que se usaron tienen una masa total de 4.54 kilogramos y un diámetro de 15 cm. Las pesas metálicas ranuradas tienen una masa de 2.27 kilogramos y una abertura central de aproximadamente 5.40 cm.

Método de Ensayo.

Para este ensayo, que se realizó sobre materiales compactados con contenidos óptimos de agua calculados en el ensayo proctor modificado (para calicata 01, 02, 03 y 04, cuyos contenidos óptimos de humedad son del 4.75%, 4.30%, 3.70% y 5.10% respectivamente), se prepararon tres especímenes. Los especímenes se compactaron usando tres diferentes esfuerzos de compactación para obtener pesos unitarios diferentes, tanto por encima como por debajo del peso unitario deseado. Después de permitir que los especímenes se cubrieran de agua para humedecerse, cada espécimen fue sometido a la penetración por un vástago cilíndrico.

Los resultados del esfuerzo versus la profundidad de penetración se plasmaron en gráficos para determinar el CBR de cada espécimen.

El CBR, a la densidad seca especificada se determina con un gráfico de CBR versus la densidad Seca.

Para ver el procedimiento y los resultados obtenidos del ensayo CBR, ver anexos N° 14, 15, 16 y 17.

3.1.14. ENSAYO PROCTOR MODIFICADO BASANDOSE EN LA NORMA NTP 339.141 + ADITIVO SIKA DUST SEAL.

Este ensayo se realizó basándose en la norma mencionada en este subtítulo, para ello se realizaron 3 combinaciones para cada muestra obtenida de cada calicata donde se calculó la solución (mezcla de aditivo + agua) basándose en la tabla N° 07. Datos experimentales del uso del aditivo Sika Dust Seal. Una vez obtenida la solución ya preparada, se le agregó a los ensayos un cierto porcentaje de solución para cada molde proctor, es decir se le añadió la solución al 2%, 4%, 6% y 8% del porcentaje en peso total de la muestra. En la fotografía 09 se puede observar el proceso de preparación de la calicata 01 – Combinación 01 – Ensayo N° 01.

Fotografía 09. Cantidad de Solución preparada para ensayo Calicata C-01



Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la solución (aditivo Sika Dust Seal + agua) para ensayos en laboratorio.

El objetivo en este subtítulo es encontrar la dosificación correcta para mejorar el suelo, tanto en el campo como en laboratorio; es por ello que se ha tomado datos referenciales de la ficha técnica del producto, según tabla 07. Datos experimentales del uso de aditivo Sika Dust Seal, el cual se menciona en el subtítulo 2.2.4.2.

Según tabla antes mencionada, por cuestiones de estabilización del suelo y mantenimiento respectivo de la vía se escogió los datos para el cálculo de la solución correcta para realizar los ensayos en laboratorio, los cuales son: 0.30 lt/m^2 , 0.40 lt/m^2 , 0.50 lt/m^2 .

Seguidamente se explica el procedimiento de cálculo de la solución para el ensayo en laboratorio, teniendo como referencia el primer dato y para la calicata C – 01.

- **En CALICATA C- 01, para 0.30 lt/m^2 .**

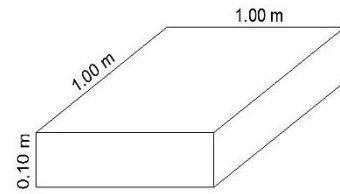
a) Cálculo del aditivo para 1 m^3 de suelo, según ficha técnica.

Como el espesor a mejorar en campo se consideró de 0.10 m , la cual se mejorará mediante los trabajos de una motoniveladora el cual se encargará de remover el material de la vía para mezclarlo con la solución. Basándose en este criterio, se realizó el siguiente cálculo:

- $V = 1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.10\text{m}$
 $V = 0.10 \text{ m}^3$

- En obra: $0.30 \text{ Lt de aditivo} \text{ ----- } 0.10 \text{ m}^3$
 $X \text{ ----- } 1\text{m}^3$

$X = 3.00 \text{ Lt de Aditivo/m}^3$



b) Cálculo de aditivo para los ensayos de proctor modificado

Se sabe que el Volumen del Molde proctor es $2,123.31 \text{ cm}^3$ y el material a usar son aproximadamente 24 kg de suelo (04 puntos).

$0.30 \text{ Lt de Aditivo} \quad \times \quad 100,000.00 \text{ cm}^3 \text{ de suelo}$
 $X \text{ Lt de Aditivo} \quad \quad \quad 2,123.31 \text{ cm}^3 \text{ de suelo}$

$X = 0.00637 \text{ Lt de Aditivo} = 6.369960 \text{ cm}^3 \text{ Aditivo/molde proctor}$

c) Cálculo del agua para el ensayo proctor modificado

Como son 04 puntos para el ensayo proctor modificado, entonces decimos:

		Litros	cm^3
1 ^{er} punto	----- 2% (6kg) -----	0.12	---- 120.00
2 ^{do} punto	----- 4% (6kg) -----	0.24	---- 240.00
3 ^{er} punto	----- 6% (6kg) -----	0.36	---- 360.00
4 ^{to} punto	----- 8% (6kg) -----	0.48	---- 480.00

Como el aditivo es líquido, entonces por cada punto se retiró 6.37 Lt de Agua, para ser reemplazados por la misma cantidad de aditivo, quedando de la siguiente manera:

	Agua (cm^3)	Aditivo (cm^3)	
1 ^{er} punto	----- 113.63	6.37	= 120.00
2 ^{do} punto	----- 233.63	6.37	= 240.00
3 ^{er} punto	----- 353.63	6.37	= 360.00
4 ^{to} punto	----- 473.63	6.37	= 480.00

Con estas dosificaciones calculadas se realiza el ensayo proctor modificado, con el fin de encontrar un nuevo contenido óptimo de humedad y realizar el ensayo C.B.R%.

d) Para el ensayo C.B.R%.

Como el contenido óptimo de humedad para la combinación 1 nos resultó $W_{\text{ópt.}} = 3.45\%$, entonces realizamos el ensayo CBR con ese contenido óptimo de humedad para los tres puntos a los 12, 25 y 56 golpes.

$$3.45\% (6\text{kg}) = 0.207 \text{ Lt} = 207 \text{ cm}^3$$

Entonces la dosificación para el ensayo C.B.R, será de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Agua :} & \quad 207.63 - 6.37 & = 200.63 \text{ cm}^3 \\ \text{Aditivo:} & \quad 6.37 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

e) Obtenidos los cálculos para las dosificaciones para los ensayos de proctor modificado y CBR%, basándose en los datos de la ficha técnica, para 0.30 lt/m^2 , 0.40 lt/m^2 y 0.50 lt/m^2 , los cálculos obtenidos para las cuatro calicatas son las siguientes:

Tabla 11. Resumen, cálculo de solución – ensayo proctor modificado (Con Aditivo)

Dosificación para ensayo Proctor Modificado con Aditivo									
CALICATA	REFERENCIA (Ficha Técnica)	Ensayo Proctor Modificado - (cm3)							
		Punto 01 (cm3)		Punto 02 (cm3)		Punto 03 (cm3)		Punto 04 (cm3)	
		Agua	Adit.	Agua	Adit.	Agua	Adit.	Agua	Adit.
C-01/C-02/C-03/C-04	Para 0.30 lt/m^2	113.63	6.37	233.63	6.37	353.63	6.37	473.63	6.37
	Para 0.40 lt/m^2	111.51	8.49	231.51	8.49	351.51	8.49	471.51	8.49
	Para 0.50 lt/m^2	109.38	10.62	229.38	10.62	349.38	10.62	469.38	10.62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Resumen, cálculo de solución – ensayo CBR (Con Aditivo)

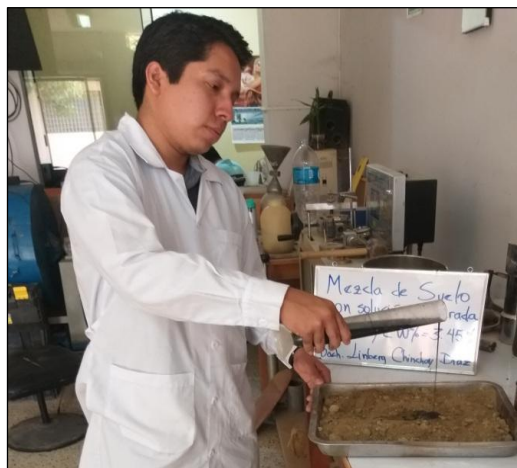
Dosificación para ensayo C.B.R.(%) - Con Aditivo					
CALICATA	REFERENCIA (Ficha Técnica)	Datos Proctor Modificado		Ensayo C.B.R. Punto 01, 02 y 03 (cm3)	
		Ds	W%	Agua	Adit.
		C-01	Para 0.30 lt/m ²	2.29	3.45
Para 0.40 lt/m ²	2.31		2.84	161.91	8.49
Para 0.50 lt/m ²	2.32		3.18	180.18	10.62
C-02	Para 0.30 lt/m ²	2.26	3.60	209.63	6.37
	Para 0.40 lt/m ²	2.30	3.80	219.51	8.49
	Para 0.50 lt/m ²	2.31	4.50	259.38	10.62
C-03	Para 0.30 lt/m ²	2.29	3.50	203.63	6.37
	Para 0.40 lt/m ²	2.30	3.26	187.11	8.49
	Para 0.50 lt/m ²	2.31	3.36	190.98	10.62
C-04	Para 0.30 lt/m ²	2.30	3.22	186.83	6.37
	Para 0.40 lt/m ²	2.31	3.09	176.91	8.49
	Para 0.50 lt/m ²	2.33	3.32	188.58	10.62

Fuente: Elaboración propia.

3.1.15. ENSAYO DE CBR (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA) BASANDOSE EN LA NORMA NTP 339.145. + ADITIVO SIKA DUST SEAL.

Para este ensayo, se basó en la norma mencionada en este subtítulo, donde para ello se realizaron 12 ensayos CBR, teniendo como referencia la Tabla 11. Resumen, cálculo de solución – ensayo proctor modificado (Con Aditivo). Es así que se hallaron nuevas densidades secas y contenidos óptimos de humedad, los cuales usamos para calcular el resultado de C.B.R final (CBR con aditivo).

Fotografía 10. Mezcla de suelo con contenido óptimo de humedad para ensayo CBR – Espécimen 01 en Calicata C-01 ($W_{opt.} = 3.45\%$)



Fuente: Elaboración propia.

Método de Ensayo

Para explicar detenidamente este ensayo de C.B.R. donde se le adicionó el aditivo Sika Dust Seal, se prepararon especímenes, teniendo en cuenta el contenido óptimo de humedad obtenido en el ensayo proctor modificado con aditivo. Para este ensayo se prepararon tres especímenes, los cuales se compactaron usando tres diferentes esfuerzos de compactación (12, 25 y 56 golpes) y en 05 capas para cada molde, con el fin de obtener densidades secas diferentes.

Posteriormente se sumergieron los especímenes al agua para humedecerse, cada espécimen fue sometido a la penetración por un vástago cilíndrico. Los resultados obtenidos de esfuerzo (carga) versus la profundidad de penetración se plasmó en gráficos que se muestran en los anexos N° 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 41.

Una vez obtenido los gráficos de Esfuerzo Vs Penetración se procedió a encontrar los esfuerzos para 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración a los 12, 25 y 56 golpes respectivamente. Seguidamente, haciendo uso de la Tabla 05. Cargas unitarias patrón – CBR, se hallaron resultados del índice de CBR para 0.1 y 02 pulgadas de penetración haciendo uso de la fórmula empírica siguiente:

$$C. B. R = 100 \times \frac{\text{Carga Unitaria del Ensayo}}{\text{Carga Unitaria Patrón}}$$

Donde, la carga unitaria del ensayo es el resultado obtenido en laboratorio, el cual se ha encontrado haciendo uso de la gráfica Esfuerzo Vs Penetración de cada espécimen y la carga unitaria patrón es la obtenida mediante la tabla 05. Cargas Unitarias Patrón – CBR, el cual se hace mención en el subtítulo 2.2.3.4.4. Valor de Soporte California (CBR). Con los índices de C.B.R. obtenidos se procedió a graficar los datos obtenidos de C.B.R. (%) y densidad seca (gr/cm^3), donde se logró encontrar el CBR al 100% y al 95% de la densidad seca máxima.

El procedimiento y los resultados obtenidos del ensayo CBR con aditivo, se muestran en anexos N° 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 41.

En la fotografía 11 se puede observar el ensayo carga penetración en calicata C-01 - molde 102 (56 golpes).

Fotografía 11. Ensayo de penetración en especímenes de calicata C-01 (Con Aditivo Sika Dust Seal)



Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS

Para la investigación se realizaron calicatas, cuyas muestras se analizaron en laboratorio con el fin de conocer las propiedades de desempeño de la subrasante de la trocha. Posteriormente se agregaron a las muestras de suelo mediante ensayos en laboratorio el aditivo Sika Dust Seal y determinar las variaciones en sus propiedades sin aditivo y con aditivo.

4.2. ANALISIS E INTERPRETACION DE DATOS

Después de haber realizado las calicatas en campo se analizaron en el laboratorio mediante ensayos las propiedades físicas y mecánicas del suelo exploradas, posteriormente se realizó los ensayos que corresponden en el laboratorio haciendo uso del aditivo Sika Dust Seal, donde se obtuvieron resultados favorables en sus propiedades mecánicas.

4.3. RESUMEN DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN LABORATORIO.

4.3.1. Resumen de la Granulometría de los Suelos.

En la tabla 13, se presenta el resumen de los parámetros de clasificación del suelo obtenidos del ensayo de granulometría de las muestras obtenidas, el cual nos sirvió para clasificar el suelo, mediante el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) y por el Método de la American Association of State Highway Officials (AASHTO), donde para ello fue necesario tener que utilizar una serie de tamices de diferentes tamaños, ya que las muestras se analizaron tanto para la fracción gruesa como para la fracción fina.

Tabla 13. Resumen de Parámetros de clasificación - Granulometría

CALICATA N°	PARÁMETROS				
	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	C _u	C _c
01	0.50	2.20	10.50	21.00	0.92
02	0.53	2.25	9.30	17.55	1.03
03	0.36	2.00	7.00	19.44	1.59
04	0.15	0.62	3.20	21.33	0.80

Fuente: Elaboración propia.

Según tabla anterior se puede notar que en las calicatas N° 01, 02, 03 y 04 según el coeficiente de uniformidad que se calculó, este parámetro nos indica que los suelos son heterogéneos, debido a que los coeficientes de uniformidad son mayores de 15.

4.3.2. Resumen de Ensayos de Límites de Consistencia (Límites de Atterberg).

Tabla 14. Resumen ensayo Límites de Consistencia

CALICATA N°	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
01	9.00	5.00	4.00
02	10.00	6.00	4.00
03	11.00	7.00	4.00
04	13.00	6.00	7.00

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 14, se puede identificar que el suelo investigado que tiene mayor índice de plasticidad es el de la calicata N° 04 (7.00), el cual tiene un límite líquido de 13.00% y un límite plástico de 6.00%. Cabe indicar que según la tabla 15. Resumen Clasificación de suelos SUCS y AASHTO, en la calicata N° 04 según SUCS el suelo resultó clasificado como una grava arenosa, pero que contiene limos y arcillas; lo antes indicado es debido a que las arenas su límite plástico es bajo, pero se calculó debido a que estos materiales granulares se encuentran constituidos por otros materiales, formando así un suelo heterogéneo.

4.3.3. Resumen de clasificación de suelos.

En la tabla 15, se indica el resumen de las clasificaciones de suelos por los métodos SUCS y AASHTO, los cuales para ello se hicieron uso de las tablas 01 y 02.

Tabla 15. Resumen Clasificación de suelos SUCS y AASHTO

CALIC. N°	CLASIFICACION SUCS	CLASIFICACION AASHTO
01	Símbolo: GP	Símbolo: A - 2 - 4 (0)
	Nombre: Grava mal gradada	Nombre: Grava arenosa con contenido de Limos o arcillas
02	Símbolo: GW	Símbolo: A - 2 - 4 (0)
	Nombre: Grava bien gradada	Nombre: Grava arenosa con contenido de Limos o arcillas
03	Símbolo: GW	Símbolo: A - 2 - 4 (0)
	Nombre: Grava bien gradada	Nombre: Grava arenosa con contenido de Limos o arcillas
04	Símbolo: SP - SC	Símbolo: A - 2 - 4 (0)
	Nombre: Arena gravilosa con Limos	Nombre: Grava arenosa con contenido de Limos o arcillas

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 15 se puede observar que para la clasificación SUCS las calicatas N° 01, N° 02 y N° 03 tienen presencia de material gravoso y la calicata N° 04 contiene material arena y con contenidos de limos. En la clasificación AASHTO podemos notar que para las cuatro calicatas antes mencionadas la clasificación arroja un suelo A – 2 – 4 con índice de grupo “0”, lo que indica que es un material para subrasante buena, pero notado la situación que presenta la capa de rodadura en épocas de lluvia y épocas de sol, este necesita ser mejorada con el aditivo Sika Dust Seal para mejorar las propiedades físicas y mecánicas y evitar la generación de polvos, ya que es incomodidad en los transportistas y en la población aledaña.

4.3.4. Resumen de Ensayo Proctor Modificado sin aditivo

El método por el cual se realizó el ensayo de proctor modificado (NTP 339.141) se hizo de acuerdo a la tabla 10, y de acuerdo a la muestra de suelo que se obtuvo de las 04 calicatas, para tal ensayo se realizó con el método C.

En la tabla 16, se identifica el resumen de los resultados del ensayo proctor modificado de las 04 calicatas exploradas sin aditivo.

Tabla 16. Resumen ensayo Proctor Modificado sin aditivo

CALICATA N°	PROGRESIVA	DATOS	
		Dens. Seca Max (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
C - 01	0+000	2.22	4.75
C - 02	1+000	2.38	4.30
C - 03	2+000	2.31	3.70
C - 04	3+000	1.93	5.10

Fuente: Elaboración propia.

Observando los resultados se puede notar que el mayor contenido óptimo de humedad lo contiene la calicata N° 04, lo que indica que el material suelo de la calicata en mención al obtener un contenido de humedad del 5.10%, este va a llegar a su densidad seca máxima mediante procesos de compactación controlados.

4.3.5. Resumen de Ensayo C.B.R sin aditivo.

En la Tabla 17, se indica el resumen de los resultados obtenidos de la prueba del ensayo de C.B.R. (NTP 339.145) de las calicatas exploradas para 0.1 pulgadas de penetración, el cual se procedió a realizar una vez obtenidos los resultados de proctor modificado.

Tabla 17. Resumen de ensayo C.B.R para 0.1" de penetración

CALICATA N°	PROGRESIVA	DATOS	
		C.B.R al 100 %	C.B.R al 95 %
C - 01	0+000	26.20	25.80
C - 02	1+000	26.45	25.80
C - 03	2+000	27.80	26.60
C - 04	3+000	24.50	24.80

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que la calicata C - 03 tiene un C.B.R. mayor a las demás calicatas, el cual es de 26.60% al 95% de la máxima densidad seca, la calicata C-4 tiene un C.B.R. de 24.80% al 95% siendo este el menor de todos.

En la Tabla 18, se mencionan los resultados obtenidos de la prueba del ensayo de C.B.R. (NTP 339.145) de las calicatas exploradas para 0.2 pulgadas de penetración.

Tabla 18. Resumen de ensayo C.B.R para 0.2” de penetración

CALICATA N°	PROGRESIVA	DATOS	
		C.B.R al 100 %	C.B.R al 95 %
C - 01	0+000	19.80	19.20
C - 02	1+000	21.50	19.80
C - 03	2+000	20.40	20.20
C - 04	3+000	18.80	18.20

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados indican que la calicata C-03 tiene un C.B.R. mayor a las demás calicatas, el cual es de 20.20% al 95% de la máxima densidad seca, la calicata C-4 tiene un C.B.R. de 18.20% al 95% siendo este el menor de todos.

4.3.6. Resumen ensayo proctor modificado + aditivo Sika Dust Seal.

Para este ensayo se tomó en cuenta los cálculos realizados que se mencionan en la tabla 11. Resumen, cálculo de solución – ensayo proctor modificado (Con Aditivo), el cual se hace mención en el subtítulo 3.1.14. Ensayo proctor modificado basándose en la norma NTP 339.141 + Aditivo Sika Dust Seal.

En la tabla 19, se muestra el resumen de los resultados del ensayo proctor modificado más aditivo Sika Dust Seal.

Tabla 19. Resumen de ensayo proctor modificado + aditivo Sika Dust Seal

CALICATA N°	DOSIFICACION (Agua+Aditivo)		DATOS	
	Agua (cm3)	Aditivo (cm3)	Dens. Seca Max	Humedad Óptima
			(gr/cm3)	(%)
C - 01	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	2.29	3.45
	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	2.31	2.84
	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	2.32	3.18
C - 02	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	2.26	3.60
	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	2.30	3.80
	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	2.31	4.50
C - 03	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	2.29	3.50
	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	2.30	3.26
	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	2.31	3.36
C - 04	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	2.30	3.22
	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	2.31	3.09
	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	2.33	3.32

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede notar en la tabla 19, los resultados indican que las mayores densidades secas obtenidas son mayores a 2.31 gr/cm^3 , esto es debido a que en estos ensayos se ha utilizado mayor cantidad de aditivo que los demás ensayos, el cual corresponde a 10.62 cm^3 de aditivo por muestra. Los contenidos óptimos de humedad que se utilizarán para el ensayo C.B.R. con aditivo son los indicados en la misma tabla.

4.3.7. Resumen ensayo C.B.R. + Aditivo Sika Dust Seal.

En la Tabla 20, se indica el resumen de los resultados obtenidos de la prueba del ensayo de C.B.R. (NTP 339.145) más aditivo, los resultados que a continuación se presentan son para 0.1 pulgadas de penetración.

Tabla 20. Resumen de ensayo CBR + aditivo para 0.1" de penetración

CALICATA N°	ENSAYO N°	DOSIFICACION (Agua+Aditivo)		DATOS	
		Agua (cm3)	Aditivo (cm3)	C.B.R al 100 %	C.B.R al 95 %
C - 01	1	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	32.00	32.60
	2	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	32.80	33.00
	3	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	32.00	32.70
C - 02	4	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	33.60	33.60
	5	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	32.00	31.50
	6	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	33.60	32.60
C - 03	7	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	31.80	31.60
	8	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	32.00	31.50
	9	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	32.00	31.80
C - 04	10	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	31.80	31.00
	11	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	31.80	31.50
	12	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	33.20	31.80

Fuente: Elaboración propia.

Visto los resultados de los ensayos realizados en laboratorio de las muestras extraídas a las calicatas C-1, C-2, C-3 y C-4 sin adicionar aditivo, los cuales se muestran en la tabla 17. Resumen de ensayos CBR para 0.1" de penetración y obtenidos los resultados que se muestran en la tabla 20 de este subtítulo, se puede notar que existe variación de resultados de CBR favorables, ya que los valores de CBR, tanto al 95% y al 100% de la máxima densidad seca ha aumentado en todas las calicatas, lo que conlleva a que la resistencia del suelo es mejorada mediante el uso del aditivo Sika Dust Seal.

En la Tabla 21, se mencionan los resultados obtenidos del ensayo de C.B.R. (NTP 339.145) más aditivo Sika Dust Seal para 0.2 pulgadas de penetración.

Tabla 21. Resumen de ensayo CBR + aditivo para 0.2” de penetración

CALICATA N°	ENSAYO N°	DOSIFICACION (Agua+Aditivo)		DATOS	
		Agua (cm3)	Aditivo (cm3)	C.B.R al 100 %	C.B.R al 95 %
C - 01	1	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	24.60	23.80
	2	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	25.20	24.80
	3	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	25.60	23.80
C - 02	4	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	25.70	24.40
	5	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	25.30	24.50
	6	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	25.50	24.00
C - 03	7	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	24.20	23.80
	8	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	25.20	24.60
	9	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	25.20	24.80
C - 04	10	2%, 4%, 6%, 8%	6.37	24.20	23.80
	11	2%, 4%, 6%, 8%	8.49	24.00	23.50
	12	2%, 4%, 6%, 8%	10.62	25.70	24.40

Fuente: Elaboración propia.

Según tabla 18. Resumen de ensayos CBR para 0.2” de penetración, los cuales hacen referencia a los ensayos realizados en laboratorio de las calicatas C-1, C-2, C-3 y C-4 sin adicionar aditivo y obtenidos los resultados que se muestran en la tabla 21 de este subtítulo, se puede notar que existe variación de resultados de CBR favorables, ya que los valores de CBR, tanto del 95% y 100% de la máxima densidad seca ha aumentado en todas las calicatas, lo que conlleva a que la resistencia del suelo es mejorada mediante el uso del aditivo Sika Dust Seal.

4.3.8. Porcentajes de aumento de CBR de los diversos ensayos.

- En la tabla 22 de muestran los resultados del aumento del CBR en porcentajes al 95% y 100% de la Máxima Densidad Seca para 0.1 pulgadas de penetración con respecto al CBR patrón calculado (sin aditivo) que se muestra en la tabla 17. Observando resultados, se concluye que el aditivo aumenta la capacidad de soporte de las diversas calicatas.

Tabla 22. Resumen de porcentajes de aumento de CBR% al 95% y 100% de la MDs para 0.1” de penetración

CALICATA N°	ENSAYO N°	CANTIDAD ADITIVO (cm3)	CBR al 95%	Aumento CBR al 95%	CBR al 100%	Aumento CBR al 100%
C-01	C-01	0.00	25.80	0.00	26.20	0.00
	1	6.37	32.60	26.36	32.00	22.14
	2	8.49	33.00	27.91	32.80	25.19
	3	10.62	32.70	26.74	32.00	22.14
C-02	C-02	0.00	25.80	0.00	26.45	0.00
	4	6.37	33.60	30.23	33.60	27.03
	5	8.49	31.50	22.09	32.00	20.98
	6	10.62	32.60	26.36	33.60	27.03
C-03	C-03	0.00	26.60	0.00	27.80	0.00
	7	6.37	31.60	18.80	31.80	14.39
	8	8.49	31.50	18.42	32.00	15.11
	9	10.62	31.80	19.55	32.00	15.11
C-04	C-04	0.00	24.80	0.00	24.50	0.00
	10	6.37	31.00	25.00	31.80	29.80
	11	8.49	31.50	27.02	31.80	29.80
	12	10.62	31.80	28.23	33.20	35.51

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior nos indica que el aumento del C.B.R. al 95% de la máxima densidad seca para 0.1” de penetración más favorable en la calicata 01 se da cuando se le adiciona al ensayo 8.49 cm³, en la calicata 02 cuando se le adiciona 6.37 cm³ de aditivo, en las calicatas 03 y 04 cuando se le adiciona 10.62 cm³ de aditivo Sika Dust Seal, originando así un aumento de C.B.R con respecto a los ensayos C.B.R. patrón (sin aditivo).

Además de ello nos indica que el aumento del C.B.R. al 100% de la máxima densidad seca para 0.1” de penetración más favorable se da en la calicata 01 cuando se le adiciona al ensayo 8.49 cm³ de aditivo, en la calicata 02 cuando se le adiciona 6.37 cm³ de aditivo, en las calicatas 03 y 04 cuando se le adiciona 10.62 cm³ de aditivo, originando así un aumento favorable de C.B.R con respecto a los ensayos C.B.R. patrón (sin aditivo).

- En la tabla 23 de muestran los resultados del aumento del CBR en porcentajes al 95% y 100% de la Máxima Densidad Seca para 0.2 pulgadas de penetración con respecto al CBR patrón calculado (sin aditivo) que se muestra en la tabla 18. Observando resultados, se concluye que el aditivo aumenta la capacidad de soporte de las diversas calicatas.

Tabla 23. Resumen de porcentajes de aumento de CBR% al 95% y 100% de la MDs para 0.2” de penetración.

CALICATA N°	ENSAYO N°	CANTIDAD ADITIVO (cm3)	CBR al 95%	Aumento CBR al 95%	CBR al 100%	Aumento CBR al 100%
C-01	C-01	0.00	19.20	0.00	19.80	0.00
	1	6.37	23.80	23.96	24.60	24.24
	2	8.49	24.80	29.17	25.20	27.27
	3	10.62	23.80	23.96	25.60	29.29
C-02	C-02	0.00	19.80	0.00	21.50	0.00
	4	6.37	24.40	23.23	25.70	19.53
	5	8.49	24.50	23.74	25.30	17.67
	6	10.62	24.00	21.21	25.50	18.60
C-03	C-03	0.00	20.20	0.00	20.40	0.00
	7	6.37	23.80	17.82	24.20	18.63
	8	8.49	24.60	21.78	25.20	23.53
	9	10.62	24.80	22.77	25.20	23.53
C-04	C-04	0.00	18.20	0.00	18.80	0.00
	10	6.37	23.80	30.77	24.20	28.72
	11	8.49	23.50	29.12	24.00	27.66
	12	10.62	24.40	34.07	25.70	36.70

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior nos indica que el aumento del C.B.R. al 95% de la máxima densidad seca para 0.2” de penetración más favorable, se da en la calicata 01 cuando se adiciona al ensayo 8.49 cm³ de aditivo, en la calicata 02 cuando se adiciona 8.49 cm³ de aditivo, en la calicata 03 cuando se le adiciona 10.62 cm³ y en la calicata 04 cuando se le adiciona 10.62 cm³ de aditivo, originando así un aumento de C.B.R con respecto a los ensayos C.B.R. patrón (sin aditivo).

Además de ello nos indica que el aumento del C.B.R. al 100% de la máxima densidad seca para 0.2” de penetración más favorable se da en la calicata 01 cuando se le adiciona 10.62 cm³ de aditivo, en la calicata 02 cuando se le adiciona 6.37 cm³ de aditivo, en la calicata 03 y 04 cuando se le adiciona al ensayo 10.62 cm³ de aditivo, originando así un aumento favorable de C.B.R con respecto a los ensayos C.B.R. patrón (sin aditivo).

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El uso del aditivo Sika Dust Seal resultó favorable en la capacidad de soporte (CBR) de la subrasante, donde para ello se tomaron muestras de las calicatas y posteriormente se realizaron ensayos en laboratorio de suelos y se determinó que la influencia que tiene el uso del aditivo en la estabilidad del suelo es mejorado.
- De las calicatas realizadas, las características físicas y mecánicas que se obtuvieron según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) fueron suelos tipo GP, GW y SP-SC (suelos que contienen gravas, arenas y limos con arcillas en pequeñas magnitudes). Según el sistema de clasificación AASHTO suelos del tipo A-2-4, los cuales contiene material granular con finos en pequeña magnitud. Si se utiliza como material base en pavimentos el material fino que lo contiene hará perder estabilidad, debido a la saturación por capilaridad. Los resultados de CBR al 95% de la máxima densidad seca para 0.1 pulgadas de penetración sin aditivo de las calicatas 01, 02, 03 y 04 son 25.80%, 25.80%, 26.60% y 31.80% respectivamente.
- Según el diseño patrón (sin aditivo) el valor más favorable de CBR al 95% de la máxima densidad seca para 0.1 pulgadas de penetración es de 26.60%, pero comparado con el resultado más favorable cuando se usa el aditivo Sika Dust Seal resulta un CBR de 33.60% al 95% de la máxima densidad seca para 0.1 pulgadas de penetración. El aumento de CBR para las calicatas 01, 02, 03 y 04 aumentó de 25.80% a 33.00%, 25.80% a 33.60%, 26.60% a 31.80% y de 24.80% a 31.80% respectivamente.
- La dosificación óptima para los ensayos de CBR en laboratorio de suelos resultó cuando se le adiciona 6.37 cm^3 de aditivo y 209.63 cm^3 de agua a una muestra de suelo que será compacta en un molde CBR, con la cual se obtendrá una máxima densidad seca de 2.26 gr/cm^3 .

5.2. RECOMENDACIONES

- Para los ensayos de proctor modificado y CBR en laboratorio haciendo uso del aditivo Sika Dust Seal se recomienda utilizar nuevas proporciones de aditivo con el objetivo de obtener nuevos resultados. Estos ensayos deben ser realizados adecuadamente y rigiéndose a las normativas.
- Se sugiere hacer nuevos estudios de investigación acerca del uso de otros aditivos que mejoren la estabilidad de los suelos de vías no pavimentadas, donde se encuentren otros tipos de suelos.
- Se recomienda realizar estudios relacionados al tema de investigación en otros tramos de trochas carrozables o vías no pavimentadas que se encuentren en la jurisdicción del distrito de Bellavista. Además se propone que este tipo de estabilización de suelos a través del uso de aditivos sea considerada en las capas inferiores de los pavimentos tanto rígidos como flexibles, ya que mejoran la capacidad de soporte de los suelos favorablemente.
- En la Universidad Nacional de Cajamarca – Sede Jaén se recomienda que el laboratorio de mecánica de suelos sea implementado con los equipos necesarios con el objetivo de inducir a los estudiantes a realizar estudios con el uso de aditivos que mejoren las propiedades físicas y mecánicas de los suelos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Hernán de Solminihac, Gerardo Echeverría, Guillermo Thenoux (2013). Estabilización química de suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos. Revista Ingeniería de construcción, 53-78.
- Velarde del Castillo, Abad Darwin (2015). Aplicación de la Metodología de Superficie de respuesta en la determinación de la resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos estabilizados con cal y cemento. Universidad Nacional del Altiplánico.
- Díaz & Mejía, 2004, Bucaramanga, Colombia. “Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos”.
- F. Rojas, A. Camargo (2004). Estabilización Física Química de suelos finos para subrasantes de vías rurales. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
- Ministerio de transportes y comunicaciones. Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito. Lima - Perú 2008.
- Norma técnica de Estabilizadores químicos MTC E 1109 – 2004. Lima – Perú 2011.
- Manual de Carreteras: “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos”. Lima – Perú 2013.
- Juárez Badillo, Rico Rodríguez (2005). Mecánica de Suelos. México. Limusa.
- Crespo Villalaz, Carlos (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones.
- Braja M. (2010). Ingeniería Geotécnica. California. J. Ross.
- Hernández, J. (2008). Características físicas y propiedades mecánicas de suelos y sus métodos de medición. Guatemala.
- Normas Técnicas Peruanas: NTP 339.128, NTP 339.129, NTP 339.134, NTP 339.135, NTP 339.141, NTP 339.145.
- Sika Dust Seal PE. 2014.