

CAPÍTULO I
DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

DISEÑO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos para la construcción de carreteras, en general, son variables y complejos. Existen muchos suelos que en su estado natural no reúnen las características adecuadas para la utilización para ciertos propósitos, por lo cual, el profesional en esta área debe tomar decisiones que pueden ser aceptar el material como está y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por su calidad, o caso contrario remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por uno de características apropiadas. Por otro lado existe una tercera alternativa de solución al problema que es mejorar sus propiedades, de tal manera que se obtenga uno que reúna en mejor forma los requisitos necesarios o que la calidad obtenida sea adecuada. Lo referente a la tercera decisión es lo que se conoce como estabilización de suelos.

Existen varios procedimientos para lograr la mejoría de los suelos, pero dos de los más efectivos son las técnicas de estabilización por medios mecánicos y por medios químicos.

En la actualidad en varios países del mundo se cuentan con una gama de datos o base de estudios realizados dando como resultados especificaciones, manuales y algunos proyectos de investigación que sirven como guías para las diferentes estabilizaciones, pero, para la adición del material estabilizante Sika Dust Seal en suelos cohesivos no existe ningún trabajo de investigación ya que es un método que se pretende incorporar dentro de las estabilizaciones.

El autor propone estudiar la influencia del aditivo (Sika Dust Seal), mediante una estabilización química, con la finalidad de mejorar las propiedades físico-mecánicas de los suelos cohesivos y poder confirmar si este aditivo propuesto es viable o no.

1.2 SITUACIÓN PROBLÉMICA

1.2.1 Conceptualización puntual del objeto de estudio

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento integral de sus propiedades geomecánicas: el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y la disminución de su compresibilidad, plasticidad y su permeabilidad, obteniéndose un

suelo firme, estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

Una estabilización compone:

- El método o técnica que se ha elegido (Estabilización mecánica, química, térmica, por medios electrónicos).
- Definir los tipos de ensayos que se tiene que realizar para poder obtener las propiedades que se pretende modificar.
- Delimitar la zona de muestreo y obtener muestras de suelos.
- Realizar los ensayos en laboratorios que se hayan definido, cuando se tenga las propiedades del suelo, tipo de suelos, cuantificar el material o sustancia que se va agregar al suelo natural, definir los alcances con la estabilización.
- Realizar ensayos al suelo natural y al suelo tratado para elaborar una comparación de cuanto se ha modificado sus características respecto al inicio.

1.2.2 Descripción del fenómeno ocurrido

Con el transcurso del tiempo se ha ido incrementando el tráfico vehicular y esto ha llevado al mejoramiento vial lo que generó el uso desmedido de materiales para el mejoramiento de sub rasante, sub base y base, de igual manera se hacen grandes movimientos de tierra para ser reemplazado por un material mejor causando mayores gastos en la utilización de maquinarias y obtención del material, en consecuencia muchas empresas ligadas a la construcción civil crearon distintos tipos de aditivos que mejoren las propiedades físicas y mecánicas de los suelos mediante una reacción química (estabilización), sin embargo, no todos estos aditivos funcionan como lo especifican o al menos no en su cien por ciento. Por esa razón es necesario realizar diversos ensayos de laboratorio para verificar la influencia del aditivo en las propiedades físicas y mecánicas de un suelo cohesivo.

1.3 BREVE EXPLICACIÓN DE LA PERSPECTIVA DE SOLUCIÓN

La perspectiva elegida es “Estudio”, se eligió esta perspectiva debido a que se efectuará una comprobación mediante ensayos de laboratorio, donde se examinará con detenimiento de como las propiedades físico-mecánicas de los suelos cohesivos mejoran al realizar la estabilización con el aditivo (Sika Dust Seal).

1.4 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

1.4.1 Problema de investigación

¿De qué manera el estudio de una estabilización química de suelos cohesivos utilizando (Sika Dust Seal) puede influir en sus propiedades físico-mecánicas?

1.4.2 Breve descripción sobre: delimitación de tiempo, factibilidad y espacio

Se tiene que tomar en cuenta el tiempo de todas las actividades que se realizarán en el proceso de estabilización y considerar como tiempo patrón la duración efectiva del periodo académico, considerando que este puede tener alteraciones que reducen el tiempo de un semestre a casi cuatro meses. Los ensayos a realizar serán efectuados en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se tiene la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos del proyecto; se debe considerar un caso extremo en que no se puedan realizar los ensayos en dicho laboratorio, como ser una toma al campus universitario. De ser este acontecimiento posible las prácticas serán realizadas en los laboratorios del SEDECA o caso contrario en un laboratorio particular para que el cronograma de actividades no tenga absolutamente ninguna clase de retraso.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

Realizar un estudio de estabilización de suelos cohesivos de subrasantes, incorporando como agente estabilizador el producto químico Sika Dust Seal con la finalidad de mejorar la resistencia al esfuerzo cortante (CBR) y el comportamiento de los suelos cohesivos.

1.5.2 Objetivos específicos

- Clasificar las muestras de suelos cohesivos para subrasantes.
- Determinar los valores de CBR del suelo natural y del suelo estabilizado.
- Validar el producto estabilizante Sika Dust Seal.
- Analizar los resultados obtenidos del suelo natural y del suelo estabilizado.
- Concluir la aplicabilidad del estabilizante Sika Dust Seal y si es recomendable para estabilizar suelos cohesivos.

1.6 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.6.1 Hipótesis

Si se realiza el mejoramiento de la resistencia al esfuerzo cortante (CBR) y el comportamiento de los suelos cohesivos (Límites de Atterberg), aplicando una estabilización química que incluya distintos porcentajes del aditivo (Sika Dust Seal), entonces se obtendrán distintas combinaciones de mezclas (Suelo Natural + Aditivo) que podrían superar las deficiencias de las propiedades del suelo natural, mediante ensayos de laboratorio.

1.6.2 Identificación de variables

Variable independiente:

Porcentajes del aditivo (Sika Dust Seal).

Variables dependientes:

Límites de Atterberg

CBR

DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.7 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación a realizar es una Investigación Explicativa, debido a que busca una relación causal entre dos o más variables, es decir busca las causas que ocasionan un problema.

1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

1.8.1 Unidad de estudio o muestreo

Ensayos de laboratorio de suelos

Número de muestras por barrio

1.8.2 Población y muestra

La población será el total de ensayos que se hacen en relación a la investigación (Ensayos de caracterización de suelos, ensayos para obtener el porcentaje recomendable)

La muestra será el número de ensayos requeridos para la investigación (Los ensayos que se realizaran a partir del porcentaje recomendable a cada muestra de suelo).

1.8.3 Tamaño de muestra

1.8.3.1 Cálculo del número de ensayos

$$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Nivel de confianza = 94% \longrightarrow $z = 1,71$

$e = 6\% = 0,06$

$\sigma^2 = 0,18$ (Valor asumido)

$$n = \frac{1,71^2 * 0,18}{0,06^2} = 146.21 \approx 147 \text{ ensayos}$$

“n” estratificado (Por medias poblacionales)

$$n = \frac{\sum N * \sigma^2}{N * \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{\sum N * \sigma^2}{N}}$$

$$n = \frac{26.46}{147 * \left(\frac{0,06}{1,71}\right)^2 + \frac{26.46}{147}}$$

$$n = 73.3 \approx 73$$

Cuadro 1: Cálculo del número de ensayos

Ensayos	Ni	σ^2	Ni x σ^2	fi	ni	ni
Contenido de humedad	19	0.18	3.42	0.13	9.47	3
Granulometría	13	0.18	2.34	0.09	6.48	0
Límites de Atterberg	55	0.18	9.90	0.37	27.43	30
Compactación	15	0.18	2.70	0.10	7.48	0
CBR	45	0.18	8.10	0.31	22.44	30
Total	147	0.90	26.46	1.00	73.30	63

Fuente: Elaboración Propia

Una vez obtenido el porcentaje recomendable de cada muestra se realizará el tratamiento estadístico con dicho porcentaje con las siguientes variables dependientes:

- Límites de Consistencia
- California Bearing Ratio (CBR)

Cuadro 2: Número de ensayos por variable dependiente

Nº Muestra	Ensayo CBR	Límites de Atterberg
% Recomendable de la muestra Nº1	10	10
% Recomendable de la muestra Nº2	10	10
% Recomendable de la muestra Nº3	10	10
Total	30	30

Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que para los datos correspondientes a la compactación (Humedad óptima y Densidad Seca Máxima) que se utilizará para realizar los 30 ensayos de CBR para el tratamiento estadístico, serán los datos correspondientes a la compactación que se determinara al momento de elegir el porcentaje recomendable para cada muestra.

MUESTRA 1

Mezcla 1: Suelo-0.25% Sika Dust Seal

Mezcla 2: Suelo-0.50% Sika Dust Seal

Mezcla 3: Suelo-0.75% Sika Dust Seal

Mezcla 4: Suelo-1.00% Sika Dust Seal

MUESTRA 2

Mezcla 1: Suelo-0.25% Sika Dust Seal

Mezcla 2: Suelo-0.50% Sika Dust Seal

Mezcla 3: Suelo-0.75% Sika Dust Seal

Mezcla 4: Suelo-1.00% Sika Dust Seal

MUESTRA 3

Mezcla 1: Suelo-0.25% Sika Dust Seal

Mezcla 2: Suelo-0.50% Sika Dust Seal

Mezcla 3: Suelo-0.75% Sika Dust Seal

Mezcla 4: Suelo-1.00% Sika Dust Seal

Para cada mezcla se realizará el ensayo de límites de consistencia, compactación y California Bearing Ratio (CBR), con la finalidad de encontrar un porcentaje recomendable, los datos de compactación de este porcentaje recomendable que se elegirá se utilizarán para realizar los 30 ensayos de CBR para el proceso estadístico.

1.9 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS LOGICOS

1.9.1 Listado de actividades a realizar, junto a los insumos y medios utilizados

a) Adquisición del material estabilizante “Sika Dust Seal”

- a.1. El producto es elaborado y distribuido por la empresa SIKA BOLIVIA S.A. el cual será enviado desde la ciudad de Santa Cruz.

b) Elaboración del capítulo II

c) Adquisición de la muestra de suelo

- c.1. Para la selección de la muestra se tiene que tener en cuenta que el suelo tiene que ser del tipo arcilloso y que cumpla con las características de ser un suelo cohesivo.

Se realizará la extracción de cinco muestras por barrio, con la finalidad de encontrar una muestra representativa por cada barrio. Los barrios forman parte de la mancha urbana de la provincia Cercado de la ciudad de Tarija; se realizará la caracterización del suelo de cada muestra de las cuales se escogerán tres muestras de distinto tipo de suelo, una por barrio con las cuales se realizará el estudio con el material estabilizante Sika Dust Seal, posteriormente se efectuará los ensayos de laboratorio correspondientes con distintos porcentajes del estabilizante Sika Dust Seal, también a cada muestra, con el propósito de encontrar el porcentaje recomendable, con el cual se realizarán:

Muestra N°1 —→ 10 CBR

Muestra N°2 —→ 10 CBR

Muestra N°3 —→ 10 CBR

c.2. Los materiales que se utilizarán para la realización del muestro serán:

Barreno

Pala

Pico

Cuchillo

Balde

Bolsas plásticas limpias

Marcadores

Hojas para identificar las muestras

c.3. El material anteriormente descrito será adquirido por recursos propios.

c.4. El tiempo que llevará realizar el muestreo a las tres zonas será de 9 horas.

Mañana (7:00 am – 12:00 pm)

Tarde (14:00 pm – 18:00 pm).

d) Contenido de humedad

d.1. El método que se utilizará para la realización de la práctica de contenido de humedad será método horno.

d.2. Los materiales necesarios son:

Recipientes para humedad (taras de lata con tapa).

Balanza de precisión de 0.01 gr.

Balanza de precisión de 0.1 gr.

Horno con regulador de temperatura (105 a 110°C).

Espátula.

d.3. El tiempo que llevará obtener el contenido de humedad de las tres muestras será de 1 ½ días, debido a que se requieren 24 horas para el secado de la muestra en el horno.

En el día 1 (9:00 am.) se colocarán las muestras al horno, previamente obtenidos sus pesos del suelo húmedo más tara.

En el día dos se determinará el peso del recipiente con la muestra seca (9:00 am).

El resto de la mañana se elaborará la planilla para la determinación del contenido de humedad.

d.4. La práctica será realizada en las instalaciones del laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

e) Granulometría

e.1. Los materiales que se utilizarán para la granulometría son:

Juego de tamices

Los tamices para disponer para la parte gruesa del material son: 2 ½ ”, 2”, 1 ½ ”, 1”, ¾”, 3/8”, N°4, N°10.

Los tamices para la parte fina del suelo son: N°40 Y N° 200.

Balanza de 0.1 y 0.01 gramos de aproximación.

Bandejas, cucharas

e.2. La práctica será realizada en las instalaciones del laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

f) Límites de Atterberg

f.1. Los materiales o equipo a utilizar para conocer el índice de plasticidad son los siguientes:

Tamiz N° 40.

Horno secador 105 a 110°C.

Balanza de precisión de 0.01 gr.

Platos u otros recipientes.

Límite líquido:

Equipo de Casagrande.

Ranurador.

Espátula

5 taras pequeñas

Límite plástico:

3 taras pequeñas

Base vidrio.

f.2. El tiempo que llevará determinar el índice de plasticidad de las tres muestras será de 2 días, debido a que se requieren 24 horas para el secado de las muestras en el horno.

g) Ensayo de compactación (AASHTO T272)

g.1. Los materiales o equipo a utilizar para realizar la compactación son los siguientes:

Molde de 2124 cm³ (Modificada T-180).

Collarín movable.

Base metálica con mecanismo de ajuste.

Martillo de 5 lb y altura de caída de 12”.

Enrasador metálico.

5 bandejas con capacidad de 6.5 Kg (T-180).

Probeta graduada de 1000 cc.

Horno de temperatura 105 – 110 °C.

Balanza de 0.1 y 0.01 gr. de aproximación.

h) CBR (California bearing ratio: Ensayo de relación de soporte de California)

h.1. El equipo a utilizar para el ensayo del CBR es el siguiente:

Equipo de compactación:

Molde cilíndrico diámetro interior 6” y altura 7” a 8”.

Collarín de 2” de altura.

Base perforada.

Disco espaciador de acero de 2.5” de altura.

Pisón o martillo de 10 Lb. Y altura de caída de 18”.

Equipo para el hinchamiento:

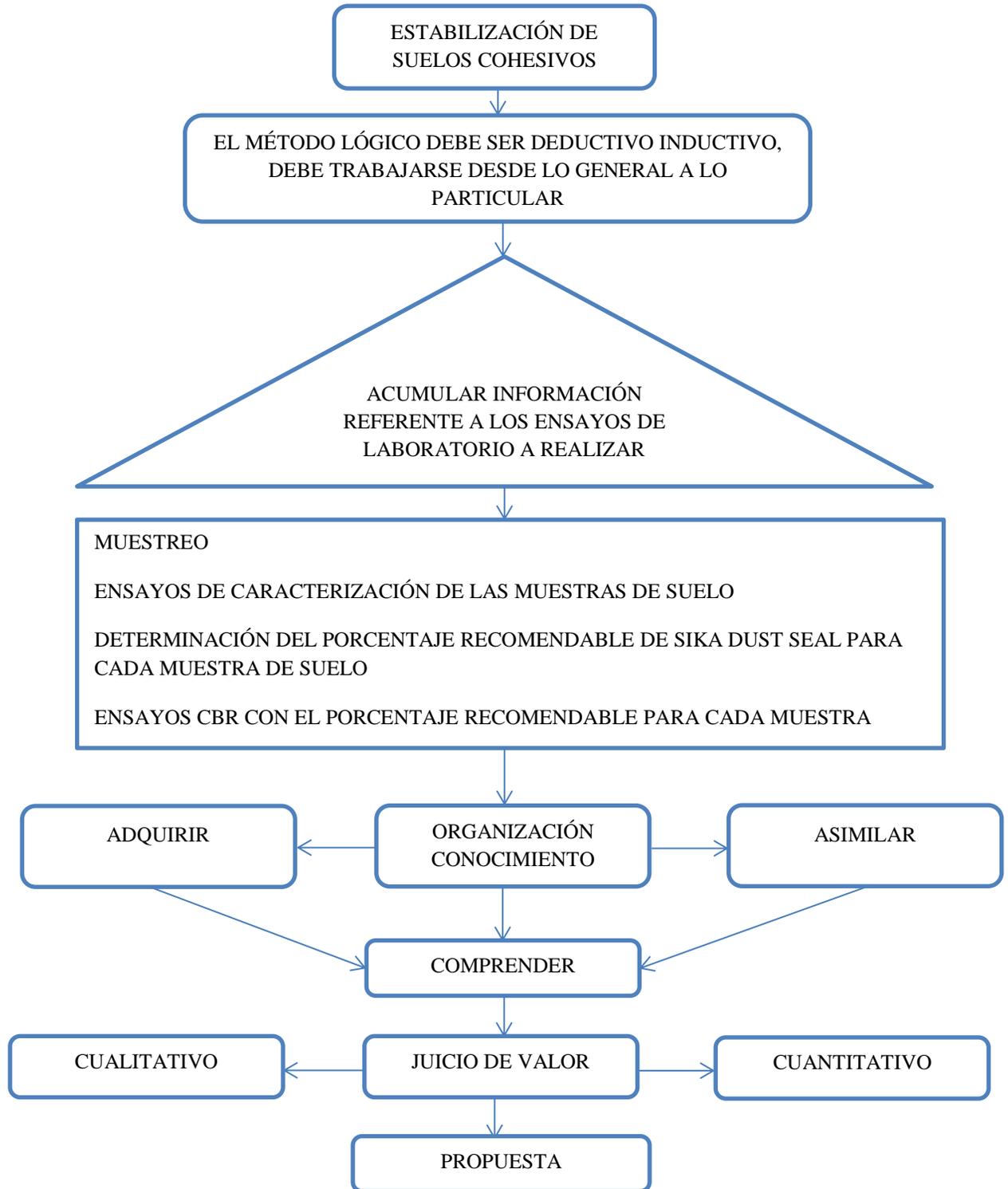
Plato y vástago con altura regulable.

Trípode y extensómetro.

Pesas anulares o en forma de herradura de 5 libras.

El tiempo que se necesita para concluir el ensayo de CBR es de 5 días.

1.9.2 Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva



1.10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

1.10.1 Distribución t de Student

En probabilidad y estadística, la Distribución t de Student es una distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño

La Prueba de hipótesis para medias usando Distribución t de Student se usa cuando se cumplen las siguientes dos condiciones:

Es posible calcular la media y la desviación estándar a partir de la muestra.

El tamaño de la muestra es menor a 30.

El procedimiento obedece a los 5 pasos esenciales:

Paso 1: Plantear hipótesis nula (H_0) e hipótesis alternativa (H_1).

La hipótesis alternativa plantea matemáticamente lo que queremos demostrar.

La hipótesis nula plantea exactamente lo contrario.

Paso 2: Determinar nivel de significancia. (Rango de aceptación de hipótesis alternativa)

Casi siempre lo proporciona el problema, y normalmente se considera:

0.05 para proyectos de investigación

0.01 para aseguramiento de calidad

0.10 para encuestas de mercadotecnia y políticas.

Paso 3: Evidencia de la muestra.

Se calcula la media y la desviación estándar a partir de la muestra.

Paso 4: Se aplica la Distribución t de Student:

Figura 1: Distribución t de Student

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Grados de Libertad = $df = n - 1$

Sabiendo que:

$\bar{X} = \text{Media}$

$\mu = \text{Valor a analizar}$

$S_x = \text{Desviación Estándar}$

$\bar{X} = \text{Media}$

$n = \text{Tamaño de muestra}$

Fuente: Recuperado de “Prueba de hipótesis para medias con Distribución t de Student”. Recuperado de <https://www.matepediaestadísticablogspot.com/p/prueba-de-hipótesis-con-distribución-t.html>.

Paso 5: En base a la evidencia disponible se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

Conclusión: Se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Se concluye de acuerdo a la información de la hipótesis alternativa.

CAPÍTULO II
ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 Estabilización de suelos

La estabilización es el proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos, buscando modificar o cambiar algunas propiedades de un suelo, para aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un suelo firme, estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno, mejorando sus propiedades físico-mecánicas y permanencia de tales propiedades en el tiempo.

2.1.2 Razón de la estabilización

Tradicionalmente, las bases y/o sub-bases estables se han construido utilizando agregados seleccionados y bien gradados. Es por lo tanto, fácil de pronosticar la capacidad de carga de las capas de base o sub-base. Con el uso de material seleccionado los ingenieros saben que la base se ha diseñado para soportar la capa final de rodadura de una carretera.

Una forma de reducir la cantidad de material especial, necesario para la construcción de una base es mejorar la capacidad del suelo existente en la sub-base suministrándole resistencia de acuerdo a las normas de ingeniería. Aquí es donde entra la estabilización de suelos. Hay varias razones por las que la estabilización de suelos se está haciendo más popular en muchas áreas.

La primera es la escasez de materiales. El uso tradicional de agregados en la construcción de vías ha producido una escasez, aún en zonas donde había suministro adecuado. En las áreas urbanas en donde más trabajo se pasa para conseguirlos. Esta falta de material se produce por disminución de fuentes de agregados, regulaciones sobre el medio ambiente y las normas de depósitos de material.

Estos factores y otros más, se han combinado para que los agregados se hayan vuelto muy costosos y en consecuencia, la construcción de vías y su mantenimiento ha subido sus costos enormemente, De tal forma, se ha puesto más atención en encontrar materiales que los reemplacen más económicamente, tales como agregados de segunda y suelos cuyas características puedan aumentarse mediante la estabilización

Otro factor a considerar es la conservación de energía (productos del petróleo). En términos de construcción de carreteras, la tendencia es hacia los materiales que necesiten menos consumo de energía para su producción, manejo y aplicación. La energía necesaria para producir y aplicar los agregados de base es una gran parte del total de energía utilizada para construir una vía, ya sea es asfalto o en concreto. De otra parte, se pueden usar cantidades relativamente pequeñas de aditivos para mejorar los sub-niveles en un sitio mediante la tecnología de estabilización, de tal forma que se reducen las demandas de energía.

2.1.3 Ventajas de los suelos estabilizados

Ventajas Técnicas:

- Permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características hasta el grado deseado.
- Proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanada, con lo que aumenta la vida de servicio del firme.
- Aseguran la estabilidad de la explanada, tanto por su inestabilidad al agua y a la helada, evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión.
- Disminuyen las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello su vida útil.
- Pueden permitir el paso inmediato del tráfico de la obras.

Ventajas Económicas y Ambientales:

- Un mayor empleo de los suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas. Esto es particularmente interesante por las restricciones para el uso de préstamos y en ocasiones no existen suelos aprovechables a una distancia aceptable.

- Ahorro en el transporte de materiales.
- Acortamiento de los plazos de ejecución, dado que el proceso de incorporación del estabilizante y de mezcla de suelo con el mismo se realiza con equipos específicos de alto rendimiento.
- La obtención de cimientos de firme de mayor capacidad de soporte permite un ahorro en las capas de firme, tanto en su constitución como en su ejecución.
- Menor generación de polvos, por existir una disminución apreciable en el movimiento de tierras.

2.1.4 Métodos de estabilización

Cuadro 3: Métodos de estabilización

Métodos	Físicos	Confinamiento (suelos no cohesivos)
		Preconsolidación (suelos cohesivos)
		Mezclas (suelo con suelo)
		Vibroflotación
	Químicos (Estabilizaciones)	Con cemento
		Con asfalto
		Con sal
		Con cal
		Con aditivos (SIKA DUST SEAL)
	Mecánicos	Compactación

Fuente: Elaboración Propia

Métodos Físicos

Los métodos físicos de mejoramiento de suelos incluyen:

Confinamiento (suelos no cohesivos):

El confinamiento de un depósito de suelo puede lograrse con la aplicación de columnas de grava, cuya construcción implica el reemplazo parcial de entre un 15 y 35% del suelo, que usualmente penetra hasta alcanzar un estrato resistente. La presencia de la columna crea un material compuesto de menor compresibilidad media y de mayor resistencia al corte que la del suelo natural. Los procedimientos para su construcción incluyen la vibrosustitución, que consiste en introducir un tubo por vibración, con inyección en la hincia para llegar hasta la profundidad máxima. El orificio se rellena luego con material de aporte (grava de tamaños en el rango de 2 a 80 mm); o bien con pilotes de grava, para

lo cual se encamisa la perforación y, alcanzado el nivel previsto se la rellena, para luego extraer la camisa.

Preconsolidación (suelos cohesivos):

La preconsolidación se logra aplicando una sobrecarga sobre un depósito de suelo, la que debe exceder la carga máxima que este va a soportar. Se busca así que la consolidación parcial sea equivalente al mayor grado que alcanzará con la carga máxima, la que requerirá mayor tiempo para producirse.

El proceso puede acelerarse por medio de drenes verticales, conectados en su parte superior por un manto de arena que permita la liberación de la humedad.

Mezclas de suelos:

La mezcla de suelos requiere la realización de una serie de ensayos, con el fin de evaluar las características de cada uno de los tipos de suelo que se desean mezclar. Este método requiere la remoción de gran cantidad de material de la superficie y no resulta práctico para el mejoramiento mecánico de depósitos de gran profundidad, por lo que su uso se limita a obras viales.

Vibroflotación:

La vibroflotación es un método apto para suelos granulares con un bajo contenido de finos. Consiste en introducir en el terreno un tubo con una cabeza vibratoria, cuya acción producirá un reacomodamiento de sus granos, lo que aumentará su densidad.

El método se aplica siguiendo una red de geometría diseñada en la superficie del terreno, de forma tal que el tratamiento alcance la totalidad del depósito. Tiene la ventaja de alcanzar profundidades importantes sin afectar edificaciones cercanas. Conforme se retira la cabeza vibratoria, el espacio vacío se rellena con material de aporte. En la superficie puede ser necesario agregar un cierto volumen de material para compensar la pérdida de volumen por el reacomodo de los granos.

Métodos Mecánicos

Compactación de Suelos:

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo- deformación de los suelos. La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del

índice de vacíos, empleando medios mecánicos; es la primera etapa del proceso de estabilización de los suelos que tiene como objetivo principal el obtener un suelo de tal manera estructurado que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado a través de toda vida útil de la obra. La compactación ha figurado entre las técnicas de construcción desde las épocas más remotas de la que se tiene noticia. Los métodos de apisonado por el paso de las personas o animales se utilizaron en épocas muy lejanas, como por ejemplo en la construcción de grandes obras hidráulicas en diversas partes de Asia. Las principales variables que afectan el proceso de compactación de los suelos son:

La naturaleza del suelo: La clase de suelo (arcilloso, grueso o finos) con la que se trabaja es una de las variables que influye de manera decisiva en el proceso de compactación de los suelos; tal es así que las técnicas y resultados que se obtengan responderán a un tipo de suelo.

El método de compactación: Los métodos de compactación pueden ser por impactos, por amasado, por aplicación de carga estática o por vibración.

La energía específica: Entendida como tal a la energía que se entrega al suelo por unidad de volumen; es decir, es la energía de compactación.

El contenido de agua original del suelo: Se refiere este concepto al contenido natural de agua que el suelo poseía antes de añadirle o quitarle humedad para compactarlo, en busca del contenido óptimo.

La temperatura: Ejerce un importante efecto en los procesos de compactación de campo, en primer lugar por efectos de evaporación del agua incorporada al suelo o de condensación de la humedad ambiente en el mismo.

Otras Variables: Otras variables que afectan el proceso de compactación de los suelos son el contenido de agua del suelo, la re compactación, el contenido de sales, la naturaleza de la arcilla, el número de pasadas del equipo de compactación por cada punto y el número de golpes del pisón compactador.

Métodos Químicos

La estabilización química se refiere al cambio de las propiedades de suelos logrado mediante la adición de cementantes orgánicos, inorgánicos o sustancias químicas especiales.

Es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y 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 mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio.

Con cemento:

Se mezcla el suelo con cemento Pórtland, lo que genera dos procesos:

- a) Los silicatos cálcicos del cemento afectan al agua convirtiéndola en alcalina. La abundancia de calcio es usada por el suelo para modificar sus cargas superficiales.
- b) Una vez que los iones de calcio son absorbidos por el suelo, el cemento se adhiere a sus partículas, para originar una cohesión que aumenta la resistencia al corte del material.

Para que el proceso sea aceptable es necesario modificar la humedad del material, compactar a la máxima densidad e incorporar suficiente cemento para que se reduzca la pérdida de peso o se produzcan cambios de volumen y humedad. Prácticamente todos los suelos pueden tratarse con este método, pero si los materiales son mal graduados se requerirá mayor cantidad de cemento para lograr el efecto deseado.

Con asfalto:

Al mezclar las partículas granulares con asfalto, se produce un material más durable y resistente. También se le agregan algunas partículas finas para llenar los vacíos. Es importante el contenido de humedad del material al anexar el asfalto y también esperar a que se evaporen los gases que este contiene antes de tenderlo y compactarlo.

Con sales:

Se forman a partir de la neutralización de un ácido con una base. Las sales normales tales como el cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl₂) o cloruro de potasio (KCl) son sales completamente neutralizadas, es decir que no contienen exceso de iones ácidos de hidrógeno (H⁺) ni básicos de hidróxilo (OH⁻). Se designan como sales ácidas aquellas que contienen exceso de iones de hidrógeno, como el bicarbonato de sodio (NaHCO₃) y a las que contienen exceso de iones hidroxilo se les designa como sales básicas. En el laboratorio, se han estudiado, un gran número de sales (NaCl, CaCl₂,

NaNO₃, Na₂CO₃, BaCl₂, MgCl₂, KCl) pero tanto la economía como su disponibilidad han hecho que solamente se utilicen algunas, siendo las más utilizadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio.

2.1.5 Propiedades de los suelos como subrasantes en carreteras

Conceptos básicos necesarios

El pavimento es un sistema estructural a base de capas que le dan las propiedades y resistencias necesarias para cumplir con las solicitudes funcionales y estructurales. A nivel de capacidad funcional, debe poseer una calidad aceptable en la carpeta de rodadura, una adecuada fricción superficial, una buena geometría por seguridad, y determinado aspecto estético. A nivel estructural debe soportar las solicitudes a las que se somete todo el paquete estructural (base, subbase y subrasante), teniendo en cuenta las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.

Las fallas que presente el pavimento serán el resultado de la interacción de los siguientes factores:

Mal diseño: El diseño del pavimento debe estar orientado a cumplir los requisitos estructurales y funcionales.

Mala práctica en la construcción.

Falta de mantenimiento o mantenimiento inadecuado.

Tránsito: Influye en magnitud y frecuencia; la frecuencia es importante porque en cada punto del pavimento habrá situaciones de carga y descarga. La principal característica de esta variable es que tiene una naturaleza cíclica o repetitiva.

Materiales inadecuados: Aquellos materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para la construcción de carreteras.

Condiciones ambientales: Como la temperatura ambiente que tiene influencia directa durante la construcción ya que hay que ver la humedad necesaria para la compactación del terreno de fundación; la napa freática, que puede alterar considerablemente la temperatura de equilibrio; el régimen de precipitaciones, que en nuestro medio se presenta en la estación de verano y que puede causar el incremento del nivel freático

además de infiltración, pudiendo afectar el funcionamiento de la superficie del pavimento ocasionando desprendimientos, hundimientos, etc.

Subrasante

Es el suelo de fundación (suelo natural libre de vegetación y compactado) en el que se apoya todo el paquete estructural. Este material puede ser tanto granular como afirmado, empedrados u otras carpetas granulares, seleccionados o cribados, producto de cortes y extracciones de canteras.

Si el terreno de fundación es malo, debe desecharse el material que lo compone, sustituyéndolo por un suelo de mejor calidad; si no es tan malo se le puede colocar una sub-base prescindiendo de ésta última si el material de fundación es bueno o regular. La subrasante tiene una gran influencia en la construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo, así las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de la base y subbase y no dan el soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación, los problemas que se presentan no serán observados sino hasta después de la culminación de la construcción, cuando la estructura entre en funcionamiento y deba soportar las cargas del tránsito. Los esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos son influidos en gran porcentaje por ésta capa, un gran porcentaje de las deflexiones que se producen en la superficie de un pavimento se le puede atribuir a las subrasantes, por este motivo se debe asegurar una buena caracterización de la subrasante.

Entre las propiedades requeridas para estos suelos tenemos:

Resistencia

Drenaje

Fácil compactación

Conservación de la compactación

Estabilidad volumétrica

Características y Control

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

Cuadro 4: Categorías de suelos para terracerías y capa subrasante

Característica	Suelos Tolerables	Suelos Adecuados	Suelos Seleccionados
Tamaño máximo	25 % > 15 cm	< 10 cm	< 8 cm
Contenido de finos (%)	....	≤ 35	≤ 25
Límite Líquido (%)	≤ 40	≤ 40	≤ 30
Índice de Plasticidad (%)	....	....	≤ 10
Peso vol. Máximo (Kg/m ³)	≥ 1450	≥ 1750	....
C.B.R. (%)	> 3	> 5	> 10
Expansión (%)	....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto IMCYC

2.1.6 Suelos arcillosos características y propiedades

Definición:

Se puede entender a los materiales arcillosos como aquéllos que poseen una parte relevante de suelos cohesivos y que como tales condicionan su comportamiento, frente a los restantes materiales existentes en las obras o en el terreno.

Arcillas:

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la aluminica.

Características de las arcillas:

Material de estructura laminar

Sumamente higroscópico

Su masa se expande con el agua

Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica

Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600°C.

Clasificación de las arcillas:

Desde el punto de vista geológico: Se pueden distinguir entre primarias las cuales son de tipo hipogénico y que permanecieron en el mismo lugar de su formación, y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen.

Fluviales: Depositadas por ríos y siendo depósitos de baja calidad.

Lacustres: Asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad.

En deltas: Son arenosas y de composición irregular.

Glaciales: Formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas.

Clasificación de los minerales arcillosos

Mineral de arcilla caolinita:

Están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas lo suficientemente firme para no permitir la penetración de moléculas de agua entre ellas (absorción). En consecuencia, las arcillas coaliníticas serán relativamente estables en presencia del agua.

Mineral de Arcilla Ilita:

Por lo general, están estructuradas análogamente que las montmorilonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grumos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen y, en general, las arcillas ilíticas, se comportan mecánicamente en forma más favorable para el ingeniero.

Mineral de Arcilla Montmorilonita:

Están formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con relativa facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce, macrofísicamente, en una expansión. Las arcillas montmoriloníticas, especialmente en presencia de agua, presentarán fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo

montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico. Estas arcillas aparecen, desdichadamente, con frecuencia en los trabajos de campo; por otra parte, en ocasiones, ayudan al ingeniero en la resolución de ciertos problemas prácticos.

2.1.7 Incidencia de arcillas en obras viales

La incidencia de las arcillas, radica en que constituyen en alto porcentaje los suelos naturales (subrasantes), con mayor énfasis en los que geológicamente aún se encuentran en formación.

Todas las estructuras viales que el hombre ha diseñado, desde siempre, incluyendo las actuales, se basan en dos premisas:

La 1º de ellas considera las cargas que deberá soportar la vía, durante el tiempo de vida útil que requerimos. Es un dato estadístico muy difícil de modificar.

La 2º premisa es la capacidad portante del suelo natural sobre el que debemos soportar nuestra vía. En la medida en que mayor sea la capacidad portante de este estrato menor será el espesor de la estructura requerida, para una carga o esfuerzo determinados, lo que redundará en economía, en todos los aspectos y menor deterioro ambiental.

Cuando la capacidad portante del suelo natural no es la adecuada o es muy baja, se busca mejorar la calidad del suelo ya sea adicionando materiales que le ayuden a mejorar las características de mencionado estrato o sustituyéndolo por otro, de ahí nace la idea de estabilizarlo.

Son suelos inadecuados para su empleo en subrasantes los suelos orgánicos o con materia orgánica (hojas, hierba, raíces, desechos orgánicos y otros materiales putrescibles), por ello no se empleará la capa de tierra vegetal, ni materiales procedentes turberas, etc., tampoco es conveniente emplear escombros y vaciados heterogéneos, que pueden dar lugar a asientos diferenciales en servicio.

En cambio es conveniente estudiar la posibilidad de empleo de subproductos y desechos industriales locales, que en algunas zonas presentan problemas ecológicos y de acopio;

cenizas volantes, desechos de cantera, ciertos materiales minerales subproductos de industrias químicas, materiales puzolánicos, etc.

2.1.8 Suelos finos cohesivos

La cohesión del suelo se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas como conjunto, como resultado de la trabazón conjunta o las microestructuras existentes en el suelo.

Los iones que forman la superficie en hojuelas de los minerales de arcilla son O^- y $(OH)^-$ por lo que estas superficies tienen una carga eléctrica negativa. Puesto que las moléculas de agua son bipolares, es decir que tienen un extremo positivo y negativo, la superficie negativa del material de arcilla atrae a las moléculas de agua, por lo que se forma una capa de agua que queda unida a la superficie del mineral por medio de un enlace de hidrógeno (H_3O^+).

La fuerza de atracción denominada fuerza de Van der Waals, se incrementa cuando el espesor de la capa de agua absorbida disminuye por un proceso de intercambio básico, lo que origina que las partículas suspendidas en agua se acerquen cada vez más. Cuando la capa absorbida es lo suficientemente delgada para que domine las fuerzas de atracción, al sedimentarse se forman grupos de partículas con sus superficies de contacto entre extremos positivo-negativo, lo que se llama floculación. Este comportamiento de las partículas de minerales de arcilla dan cohesión a la masa de suelo, manteniéndola unida.

La tendencia de los materiales arcillosos a hincharse, si son de naturaleza expansiva, originan un aumento de volumen del conjunto de las partículas. En consecuencia, se puede alcanzar la saturación con una disminución apreciable de la densidad seca. Si el material es sometido a un proceso de secado, no se verifica una recuperación de la densidad seca inicial. Sobreviene un mecanismo de fisuración por retracción del suelo.

En servicio, el resultado final de una serie de ciclos de humedecimiento y secado, lleva al suelo a fluctuar en un entorno de densidad seca y humedad acotados. A ambos entornos se lo suele asociar con la humedad y densidad de equilibrio. Los mismos dependerán de factores tales como la carga exterior a que está sometido, las características expansivas de los materiales arcillosos interpuestos entre los granos, la permeabilidad del material. Además, depende del tiempo en que actúan y que tardan en

ponerse en acción cada uno de los efectos mencionados. Un exceso de densificación en un suelo arcilloso, hará evolucionar la humedad y densidad hasta que se alcance dicho ámbito de equilibrio.

En el caso inverso, una insuficiencia de densificación, provocará la consolidación del material con incremento de la densidad seca. En un terraplén, las condiciones de ingreso y egreso de agua, no son uniformes. Por lo tanto esta situación puede derivar en expansiones y contracciones irregulares. Esta situación puede manifestarse como deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. Sobre la base de este escenario es que importa poder predecir tal ámbito antes de la construcción, lo que redundará en ventajas técnicas y económicas.

2.1.9 Peso específico relativo de los suelos

En Mecánica de Suelos se relaciona el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes, por medio del concepto de peso específico, es decir, la relación entre el peso de la sustancia y su volumen.

El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en el laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase. El peso específico se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}}$$

Dónde:

γ = Peso específico relativo de un suelo

W_s = Peso del suelo seco

W_{fw} = Peso del frasco lleno de agua

W_{fsw} = Peso del frasco con suelo y agua

Todas las magnitudes son mensurables en laboratorio. El peso del frasco lleno de agua hasta el enrase es función de la temperatura de prueba, éste valor generalmente se extrae de la curva de calibración.

El peso del suelo seco se determina antes de la prueba en materiales gruesos y después de ella en suelos finos plásticos, la razón es que si los suelos arcillosos son secados antes de la prueba estos pueden formar grumos y dentro de ellos crear vacíos de aire.

Luego de calculados los pesos específicos a veces se tiene la necesidad de ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20 °C, cuya densidad de agua es 0.99791.

2.1.10 Granulometría de los suelos

En cualquier masa del suelo, los tamaños de los granos varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de suelos de grano grueso es generalmente determinada mediante análisis granulométrico por mallas. Para suelo de grano fino, la distribución granulométrica puede obtenerse por medio de análisis granulométrico con el hidrómetro.

2.1.10.1 Análisis granulométrico por mallas

Un análisis granulométrico por mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo a través de una serie de mallas cada vez más pequeñas y con una charola en el fondo. La cantidad de suelo retenido en cada malla se mide y el por ciento acumulado de suelo que pasa a través de cada malla es determinado. Este porcentaje es generalmente denominado el “porcentaje que pasa”.

El porcentaje que pasa por cada malla, determinado por un análisis granulométrico por mallas, se grafica sobre papel logarítmico, el diámetro del grano D se grafica sobre la escala logarítmica y el porcentaje que pasa se grafica sobre la escala aritmética.

2.1.10.2 Análisis granulométrico por medio del Hidrómetro

El análisis granulométrico con el hidrómetro se basa en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en agua. Para esta prueba se utilizan 80 gramos de suelo seco pulverizado. Un agente defloculante se agrega siempre al suelo. El agente defloculante más usado para el análisis granulométrico con hidrómetro es 125 ml de solución de 4% de silicato de sodio. Se deja que el suelo se sature por lo menos 24 horas en el defloculante. Después de este periodo se agrega agua destilada y la mezcla suelo-agente defloculante es agitada vigorosamente. La muestra se transfiere a una probeta de 1000

ml. Se agrega más agua destilada a la probeta hasta la marca de 1000 ml y luego la mezcla es agitada vigorosamente.

Un hidrómetro se coloca dentro de la probeta para medir la densidad de sólidos de la suspensión suelo-agua en la vecindad de su bulbo.

Los hidrómetros están calibrados para mostrar la cantidad de suelo que aún está en suspensión en cualquier tiempo dado, t . el diámetro máximo de las partículas de suelo aun en suspensión en el tiempo t se determina mediante la ley de Stokes.

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(G_s - 1)\gamma_w}} \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Dónde:

D = Diámetro de las partícula del suelo

G_s = Peso específico de los sólidos del suelo

η = Viscosidad del agua

γ_w = Peso específico del agua

L = Longitud efectiva (es decir, longitud medida de la superficie del agua en la probeta al centro de gravedad del hidrómetro).

t = Tiempo.

Las partículas de suelo con diámetros mayores que los calculados con la anterior ecuación se habrán asentado más allá de la zona de medición. Así, con las lecturas tomadas en tiempos diferentes en el hidrómetro, el porcentaje de suelo más fino que un diámetro dado D puede calcularse y prepararse una gráfica de la distribución granulométrica. Los procedimientos del cribado e hidrómetro pueden combinarse para un suelo que tenga granos finos y gruesos.

2.1.10.3 Límites del tamaño para suelos

Varias organizaciones han intentado desarrollar los límites de tamaño para gravas, arenas, limos, y arcillas en base a tamaños de las partículas de los suelos. La siguiente tabla presenta los límites de tamaño recomendados en el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y en el sistema

Unified Soil Classification (Corps of engineers, Department of the Army y Bureau of Reclamation). En la siguiente tabla, se muestra que las partículas de suelo más pequeñas que 0.002 mm son clasificadas como arcilla.

Cuadro 5: Límites del tamaño para suelos

Sistema de clasificación	Tamaño del grano (mm)
Unificado	Grava: 75 mm a 4.75 mm Arena: 4.75mm a 0.075 mm Limo y arcilla (finos). <0.075 mm
AASHTO	Grava: 75 mm a 2 mm Arena: 2 mm a 0.05 mm Limo: 0.05 mm a 0.002 mm Arcilla <0.002 mm

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

2.1.11 Límites de Atterberg

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo es secado gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua, éste, en por ciento, con el que el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico se define como límite líquido (LL). Igualmente, los contenidos de agua, en por ciento con el que el suelo cambia de un estado plástico a un semisólido y de un semisólido a un sólido se definen como el límite plástico (PL) y el límite de contracción (SL), respectivamente. Esos se denominan límites de Atterberg.

- El límite líquido de un suelo es determinado por medio de la copa de Casagrande de (Designación de prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de ½ in (12.7 mm) mediante 25 golpes.
- El límite plástico se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 1/8 pulg (3.18mm) de diámetro (designación de prueba D-4318 de la ASTM)

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo se define como el índice de plasticidad (PI)

$$IP = LL - PL$$

2.1.12 Sistemas de clasificación de los suelos

Los sistemas de clasificación de suelos dividen a estos en grupos y subgrupos en base a propiedades ingenieriles comunes tales como la distribución granulométrica, el límite líquido y el límite plástico. Los dos sistemas principales de clasificación actualmente son el sistema Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification System (SUCS), el sistema de clasificación AASHTO se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones.

- Sistema AASHTO
- Sistema Unificado De Clasificación de Suelos

2.1.12.1 Sistema AASHTO

El Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO fue propuesto originalmente por el Highway Research Boards Committee sobre clasificación de materiales para subrasantes y caminos de tipo granular (1945). De acuerdo con la actual forma de este sistema, los suelos pueden clasificarse según ocho grupos principales, A-1 al A-8, en base a la distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos comprendidos en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso y aquellos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son de grano fino. La turba, el lodo y otros suelos altamente orgánicos quedan clasificados en el grupo A-8. Éstos son identificados por inspección visual.

Para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material de subrasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo. Entre mayor es el valor del índice de grupo para un suelo, será menor el uso del suelo como subrasante. Un índice de grupo de 20 o más indica un material muy pobre para ser usado al respecto.

La fórmula para el índice de grupo es:

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Dónde: IG= Índice de grupo.

a= %Pasa N°200 – 35% (Si %N°200>75, se anota 75, si es<35, se anota 0)

b= %Pasa N°200 – 15% (Si %N°200>55, se anota 55, si es<15, se anota 0)

c= Límite líquido – 40% (Si LL>60, se anota 60, si es<40, se anota 0)

d= Índice de Plasticidad – 10% (Si IP>30, se anota 30, si es<10, se anota 0)

Condicionando que cualquier factor que pudiese salir negativo; éste se asume con el valor de cero.

El índice de grupo es redondeado al número entero más cercano y se escribe al lado del grupo de suelo en paréntesis.

Para una adecuada comprensión se presenta la siguiente tabla para la clasificación AASHTO.

Cuadro 6: Clasificación de suelos sistema AASHTO.

Clasificación	Materiales Granulares (35% o menos del total pasa tamiz N° 200)							Materiales Limo Arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de 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
Porcentaje de material que pasa tamiz											
N°10 N°40 N°200	50máx 30máx 15máx	50máx 25máx	51min 10máx	35máx	35máx	35máx	35máx	36min	36min	36min	36min
Características de la fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL: IP:	6max		NP	40máx 10máx	41min 10máx	40máx 1min	40min 11min	40máx 10máx	41min 10máx	40máx 11min	41min 11min
Índice de Grupo	0		0	0		4máx		18máx	12máx	16máx	20máx

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

2.1.12.2 Sistema unificado de clasificación de suelo

Fue inicialmente propuesto por Arthur Casagrande en 1942, adoptado por el Departamento de Ingeniería de los EEUU en 1948. Está basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquido y plástico).

En el Sistema Unificado, los siguientes símbolos se usan como identificación.

Cuadro 7: Clasificación de suelos sistema unificado.

Símbolo	G	S	M	C	O	Pt	H	L	W	P
Descripción	Grava	Arena	Limo	Arcilla	Limos orgánicos y arcilla	Turba y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduados	Mal graduados

Fuente: “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta Edición

El sistema unificado de clasificación clasifica los suelos en dos amplias categorías:

1. Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.
2. Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

W= Bien graduado

P= Mal graduado

L= Baja plasticidad (límite líquido menor que 50)

H= Alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

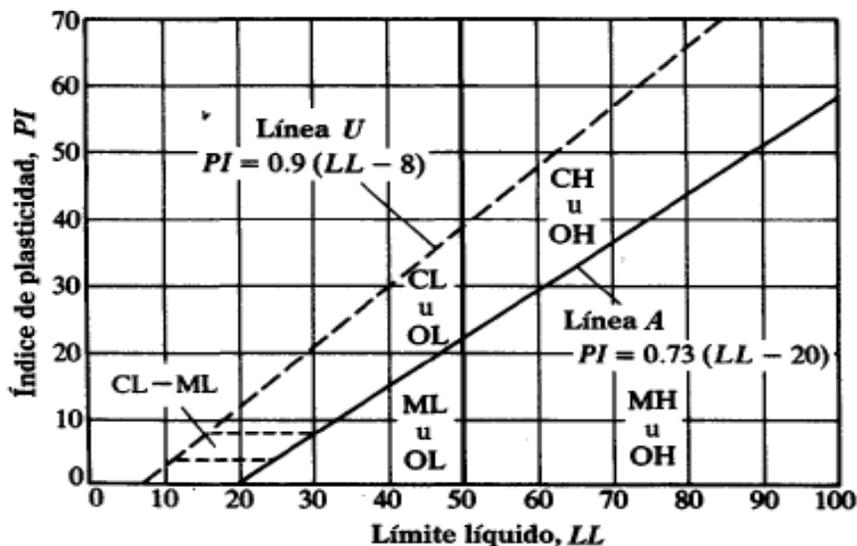
Carta de plasticidad

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos.

Las pruebas son usadas ampliamente por ingenieros para correlacionar varios parámetros físicos del suelo así como para la identificación del mismo. Casagrande (1932) estudió la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad. La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación $PI = 0.73(LL - 20)$. La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos para las arcillas inorgánicas se encuentran arriba de la línea A y aquellas para limos inorgánicos se hayan debajo de la línea A. Los limos orgánicos se grafican en la misma región (debajo de la línea A y con el LL variando entre 30 y 50) que los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo de la línea A y LL mayor que 50). La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Note que una línea llamada línea U se encuentra arriba de la línea A. La línea U es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora. La ecuación para la línea U se da como: $PI = 0.9(LL - 8)$.

Figura 2: Carta de plasticidad



Fuente: "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", Braja. M Das. Quinta Edición

2.1.13 Compactación

La prueba de laboratorio usada generalmente para obtener el peso específico seco máximo de compactación y el contenido de agua óptimo es la prueba Proctor de compactación (Proctor, 1933).

En general la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco.

Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación esta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre si y se muevan a una posición de empaque más denso.

Prueba Proctor estándar

Cuadro 8: Especificaciones para prueba de Proctor estándar (ASTM D698-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie ³ (943.3 cm ³)	0,0333 pie ³ (943.3 cm ³)	0,075 pie ³ (2124 cm ³)
Peso del pisón	24.4 N	24.4 N	24.4 N
Altura de caída del pisón	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)
Numero de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Numero de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	591.3 kN-m/m)	591.3 kN-m/m)	591.3 kN-m/m)
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm).	Porción que pasa la malla ¾ pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla ¾ pulg (19,0 mm).

Fuente: Braja M. D. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Editorial International Thomson Editores, S.A. de C.V. México.

Prueba Proctor modificado

Cuadro 9: Especificaciones para prueba de Proctor modificado (ASTM D 1557-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie ³ (943.3 cm ³)	0,0333 pie ³ (943.3 cm ³)	0,075 pie ³ (2124 cm ³)
Peso del pisón	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del pisón	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)
Numero de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Numero de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	2696 kN-m /m ³	2696 kN-m /m ³	2696 kN-m /m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm).	Porción que pasa la malla ¾ pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla ¾ pulg (19,0 mm).

Fuente: Braja M. D. (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Editorial International Thomson Editores, S.A. de C.V. México.

2.1.14 Ensayo de la relación de soporte de California (CBR)

El ensayo CBR (la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte) mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado sino que se aplica al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado.

La resistencia al esfuerzo cortante de una masa de suelo friccionante depende de las siguientes características del propio material:

Compacidad

Forma de los granos

Distribución granulométrica

Resistencia individual de las partículas

Tamaño de las partículas.

El método de CBR fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. Staton y D. J. Porter, del departamento de carreteras del estado de California, como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material de base en construcción de carreteras (pavimentos flexibles). Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos.

El número CBR (o simplemente, CBR) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en libras por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración 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 triturado. En forma de ecuación esto es:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patrón}} * 100$$

De esta ecuación se puede ver que el número CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero, como 3, 45, 98.

El número CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5 mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.0 mm. es mayor, el ensayo deberá repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5.0 mm. de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificada). A menudo se compactan dos moldes de suelo, uno para penetración inmediata y otro para penetración después de dejado saturar por un período de 96 horas. El segundo espécimen es saturado durante 96 horas con una sobrecarga aproximadamente igual al peso del pavimento que se utilizará en el campo pero en ningún caso el peso de la sobrecarga será menor de 4.5 Kg. Es necesario durante este período tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del período de saturación se hace la penetración para obtener el valor de CBR para el suelo en condición de saturación completa.

En ambos ensayos de penetración para determinar los valores de CBR se coloca una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud de la que se utilizó durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

1. Dar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
2. Dar indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una tasa de deformación unitaria de 1.27 mm./min. Se toman lecturas de carga contra penetración a cada 0.5 mm. de penetración hasta llegar a un valor de 5.0 mm. A partir del cual se toman lecturas con incrementos de 2.5 mm. Hasta obtener una penetración total de 12.7 mm.

2.1.15 Aplicación en campo

Procedimiento de estabilización en campo

1. Estudio previo de laboratorio
 - 1.1. Estudiar humedad óptima de compactación
 - 1.2. Estudiar dosificaciones mínimas para la mejora necesaria
2. Estudio de humedad in situ (para estimar agua necesaria para la compactación)
3. Escarificar/roturar el suelo (a la profundidad requerida de tratamiento)

La escarificación busca desprender la capa del suelo con la cual se va a trabajar y al mismo tiempo reducir un poco el tamaño de las partículas.

El equipo que se utiliza para este trabajo consiste comúnmente en escarificador de motoniveladora.

Figura 3: Escarificación del suelo a tratar



Fuente: Recuperado de “Maquinaria de obra civil”, de Escuela Politécnica Superior de Ávila. Recuperado de <http://ocw.usal.es/enseñanzas-técnicas/ingeniería-civil/contenido.html>

4. Aplicar el producto

4.1. Diluir producto en agua: Diluir el producto en agua de compactación.

Dentro del camión aguatero se coloca la dosis calculada de Sika Dust Seal para la superficie de suelo a tratar y se mezcla con la cantidad de agua necesaria para compactar el suelo a través de bruscos movimientos del camión aguatero formando una solución entre producto y agua.

Figura 4: Preparación de la mezcla Sika Dust Seal + agua



Fuente: Recuperado de “Maquinaria de obra civil”, de Escuela Politécnica Superior de Ávila. Recuperado de <http://ocw.usal.es/enseñanzas-técnicas/ingeniería-civil/contenido.html>

4.2. Regar en la dotación definida por los ensayos

Una vez hecha la solución entre Sika Dust Seal y el agua necesaria para compactar esta se aplica en diversas pasadas sobre la superficie a tratar procurando realizar riegos parejos y homogéneos.

Figura 5: Riego de solución Sika Dust Seal + agua en el camino a tratar



Fuente: Gomez, C. (03 de agosto, 2015). Aplicación Sika Dust Seal. Recuperado de <https://www.aplicacionsikadustseal/i.ytimg.com/vi.jpg>

5. Mezclar exhaustivamente

Con la finalidad de que la aplicación del producto Sika Dust Seal entre en contacto con la mayor cantidad de partículas del suelo a tratar es necesario homogeneizar la humedad de los riegos en forma mecánica a través de la rastra de discos.

Figura 6: Mezcla de suelo con la solución Sika Dust Seal + agua



Fuente: Recuperado de “Maquinaria de obra civil”, de Escuela Politécnica Superior de Ávila. Recuperado de <http://ocw.usal.es/enseñanzas-técnicas/ingeniería-civil/contenido.html>

6. Darle forma a la traza para la compactación con motoniveladora

Producto de la acción mecánica de la rastra de discos el perfil de la carretera tratada queda muy irregular siendo necesario corregir dicho perfil por medio de la motoniveladora para una correcta compactación de suelo, sin olvidar prever la perfecta canalización de agua, los niveles con pendiente, y los drenajes adecuados tanto transversales como longitudinales.

Figura 7: Corrección del perfil de la calzada



Fuente: Recuperado de “Maquinaria de obra civil”, de Escuela Politécnica Superior de Ávila. Recuperado de <http://ocw.usal.es/enseñanzas-técnicas/ingeniería-civil/contenido.html>

7. Compactar

Una vez alcanzados los valores de humedad óptima en el suelo a través de los riegos de agua y Sika Dust Seal y éste ha sido total e íntimamente mezclado debe compactarse de inmediato con rodillo pata de cabra. Cuando se utiliza este tipo de rodillo para la compactación inicial, el material debe estar suelto para que las patas puedan llegar hasta el fondo de la capa e ir compactando gradualmente.

Figura 8: Compactación de suelo tratado



Fuente: Recuperado de “Maquinaria de obra civil”, de Escuela Politécnica Superior de Ávila. Recuperado de <http://ocw.usal.es/enseñanzas-técnicas/ingeniería-civil/contenido.html>

La compactación termina con un segundo rodillo neumático liviano con el fin de sellar las fisuras.

Para obtener los mejores resultados en la compactación se debe comenzar inmediatamente después de la elaboración de la mezcla de suelo, Sika Dust Seal y agua. En esta forma se obtiene de manera rápida las densidades necesarias, hay menos evaporación del agua y el rendimiento aumenta.

La maquinaria y/o equipo necesario para la aplicación del producto en campo es la siguiente:

Figura 9: Maquinaria y/o equipo necesario



MOTONIVELADORA



TRACTOR + ARADO DE DISCO



CAMIÓN AGUATERO



RODILLO NEUMÁTICO



RODILLO PATA DE CABRA

Fuente: Recuperado de “Maquinaria de obra civil”, de Escuela Politécnica Superior de Ávila. Recuperado de <http://ocw.usal.es/enseñanzas-técnicas/ingeniería-civil/contenido.html>

2.1.16 Aspectos negativos del producto

Según la hoja de especificaciones técnicas, el producto Sika Dust Seal no cuenta con aspectos negativos, ya que describe que no es un producto tóxico, ni contaminante, dando total seguridad a los trabajadores y protección al medio ambiente.

A su vez es importante recalcar que la aplicación de éste producto evita la suspensión de finos en caminos de tierra, logrando controlar éste tipo de contaminación y daño que provoca a las personas afectadas de las zonas.

2.2 MARCO REFERENCIAL

Con el desarrollo del país, la demanda creciente de infraestructura de transporte para unir todas las regiones exige que se optimice la inversión y se cumpla con los objetivos de cada proyecto. La utilización adecuada de nuevas tecnologías que permitan un mejor desempeño de las estructuras de pavimento e incrementen su vida útil, resultan importantes para el diseño de nuevas vías y el mantenimiento de las existentes.

En nuestro país no existe mucha información ni mucha experiencia, la escasa base de datos desarrollada en nuestro país nos muestra la falta de estudios que faltan hacer, sin embargo existe investigaciones de estabilización de suelos con cal y otros productos químicos, las cuales serán tomadas como referencia para la elaboración de esta investigación.

2.3 MARCO NORMATIVO

La normativa usada para la realizar el presente trabajo está basada en el manual de ensayos de suelos y materiales de la administradora boliviana de carreteras que a su vez es una recopilación de las siguientes normativas.

- Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
- Association Society for Testing Materials. (ASTM).

Cuadro 10: Normativa de ensayos

Ensayo	Normativa
Contenido de humedad	ASTM D2216
Determinación del peso específico de los suelos	(ASTM D854 AASHTO T100)
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
Análisis granulométrico por hidrómetro	ASTM D422
Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
Determinación del índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Ensayo de compactación método Proctor modificado.	(ASTM D422 AASHTO T180)
Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración Propia

2.4 POSICIÓN DEL INVESTIGADOR

El incremento de los costos de construcción y mejoramiento de la vialidad en general, ha planteado a los ingenieros viales un reto: la investigación y desarrollo de nuevas técnicas que permitan una utilización más racional de los recursos disponibles. El alto costo del transporte de granulares obliga a su preservación, recuperación y reutilización (reciclaje) para lograr la indispensable transitabilidad en la vialidad, además de su innegable aporte a la conservación ambiental.

Los suelos para la construcción de carreteras, en general, son variables y complejos. Existen muchos que en su estado natural no reúnen las características para materiales de fundación y construcción, por lo cual, se presentan tres decisiones para su utilización:

- Aceptar el material como está y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por su calidad.
- Remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por uno de características apropiadas.
- Mejorar sus propiedades, de tal manera que se obtenga uno que reúna en mejor forma los requisitos necesarios o cuando menos que la calidad obtenida sea

adecuada. Lo referente a la tercera decisión es lo que se conoce como estabilización de suelos.

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento integral de sus propiedades geomecánicas: el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y la disminución de su compresibilidad y su permeabilidad.

CAPÍTULO III
CRITERIOS DE RELEVAMIENTO DE LA
INFORMACIÓN

3.1 RECONOCIMIENTO DEL SITIO DE APLICACIÓN

Sobre el sitio de aplicación podemos establecer que se desarrollará en dos etapas, la primera etapa de campo y la segunda etapa de laboratorio.

En cuanto a la primera etapa consiste en reconocer en campo los lugares precisos de donde se extraerán las muestras en la cantidad suficiente para realizar tanto la caracterización como el estudio para ello se debe tener en cuenta la accesibilidad a las zonas de donde se extraerán las muestras, las condiciones del terreno tanto superficial como a una adecuada profundidad. En este caso, las muestras son pertenecientes a tres barrios los cuales forman parte de la mancha urbana de la provincia Cercado de la ciudad de Tarija, siendo los siguientes barrios:

Barrio Constructor

Barrio Lourdes

Barrio Paraíso

Se optó por realizar la extracción de la muestra de estos lugares debido a que por una inspección visual se nota que existe mucho material fino, y en los mismo cuentan con aperturas de calles en las cuales la presencia de polvo debido al tráfico es sumamente alta.

3.2 MÉTODO DE MUESTREO

El método de muestreo que se utilizará para el presente trabajo es el muestreo por conveniencia, el cual es un muestreo no probabilístico, en este método de muestreo se debe de tener conocimiento de los elementos de la población y decidir cuales pueden tener mejor información y seleccionarlos por conveniencia.

Para tener conocimiento de los elementos de la población se opta por realizar el muestreo en distintas zonas de los barrios en estudio, con el propósito de caracterizar los suelos provenientes de dicho muestreo para poder elegir una muestra representativa de cada barrio la cual será tratada con el aditivo Sika Dust Seal.

El criterio que se utilizará para elegir la muestra representativa por barrio será el siguiente:

1. La muestra representativa de un barrio será aquella que repita el tipo de suelo (según la clasificación AASHTO) el mayor número de veces con respecto al número de muestras extraídas de dicho barrio.
2. De las muestras que tengan similitud en su clasificación según AASHTO, es decir del grupo de muestras que tengan la misma clasificación por barrio se optará por elegir como muestra representativa a la que presente propiedades más críticas y desfavorables para que estas muestras sean tratadas con Sika Dust Seal.
3. Las muestras que tengan las propiedades más críticas vendrán a ser las que presenten un índice de plasticidad más elevado, ya que a mayor índice de plasticidad de un suelo mayor inestabilidad presenta éste.

Se obtendrán el siguiente número de muestras:

Barrio Constructor → 5 muestras de distintas zonas pertenecientes al barrio

Barrio Lourdes → 5 muestras de distintas zonas pertenecientes al barrio

Barrio Paraíso → 3 muestras de distintas zonas pertenecientes al barrio

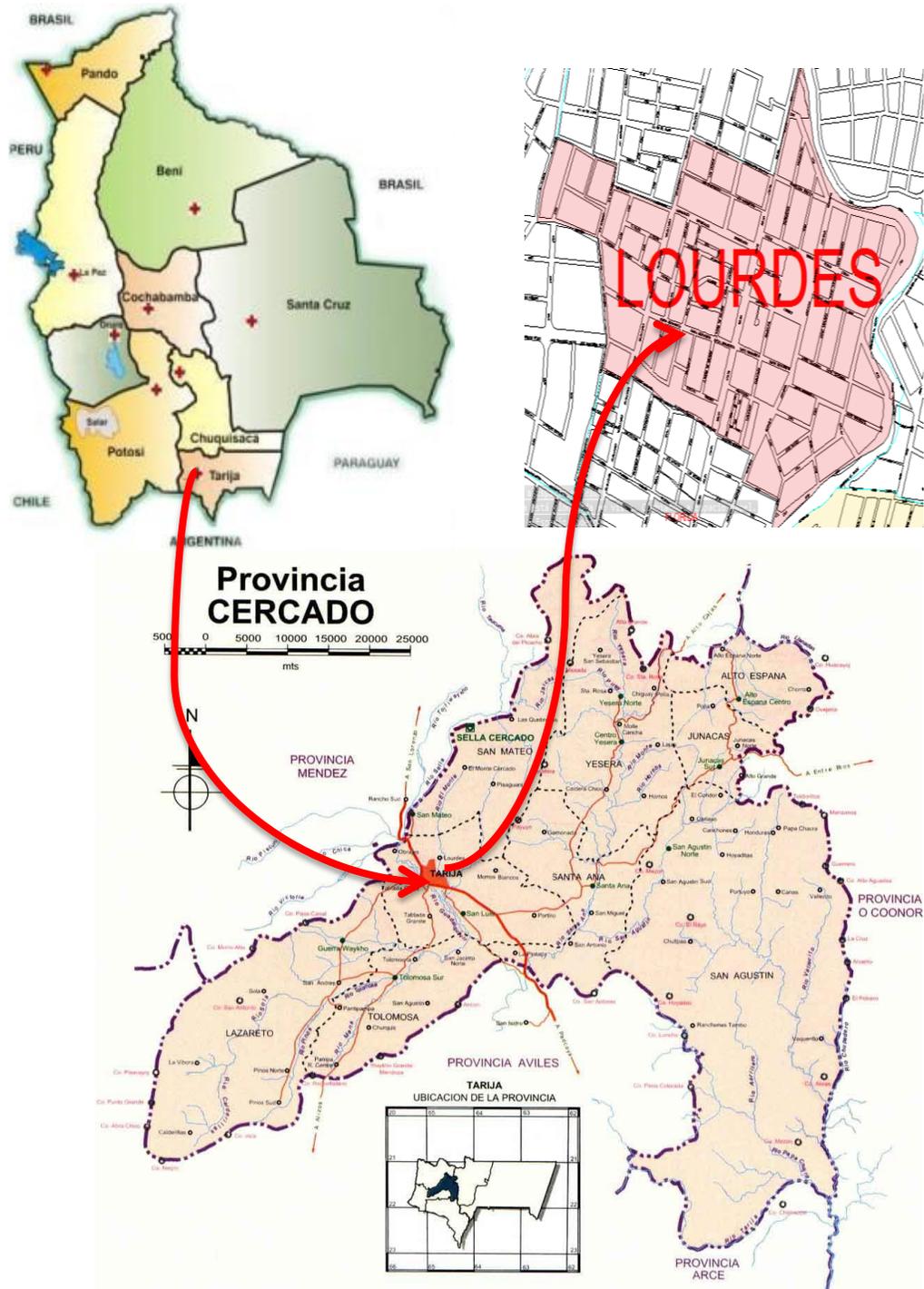
Cabe notar que en el barrio Paraíso se extraerán menos muestras que en los demás barrios debido a que dicho barrio tiene un área mucho más pequeña a comparación de los otros barrios a ser estudiados.

La segunda etapa es realizada en el laboratorio de suelos de la carrera de ingeniería civil de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” y en el laboratorio “S.A.H.” donde se realizarán todas las pruebas necesarias con los materiales y equipos adecuados, para un posterior procesamiento de datos.

3.3 UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS

3.3.1 Ubicación del barrio Lourdes

El barrio Lourdes se encuentra ubicado dentro de la mancha urbana de la provincia Cercado de la ciudad de Tarija.



- MUESTRA L-1

La muestra L-1 se encuentra ubicada sobre la calle Suipacha, a media cuadra antes de llegar a la calle Eliodoro Camacho. Coordenadas:

E321428

N7619720

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 10: Ubicación de la zona de muestreo L-1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 11: Extracción de muestra L-1



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA L-2

La muestra L-2 se ubica entre la calle General Trigo y calle Lourdes|

Coordenadas:

E 321207

N 7620180

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 12: Ubicación de la zona de muestreo L-2



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA L-3

La muestra L-3 se encuentra ubicada entre las calles Mario Velásquez y Francisco Arce.

Coordenadas:

E 321783

N 7620100

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 13: Ubicación de la zona de muestreo L-3



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA L-4

La muestra L-4 se encuentra ubicada sobre la calle Pachacutec, entre calle Cordillera Oriental y calle Sin Nombre. Coordenadas:

E 321613

N 7620520

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 14: Ubicación de la zona de muestreo L-4



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA L-5

La muestra L-5 se ubica entre la calle O. Rojas y calle Sin Nombre

E 320816

N 7620430

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

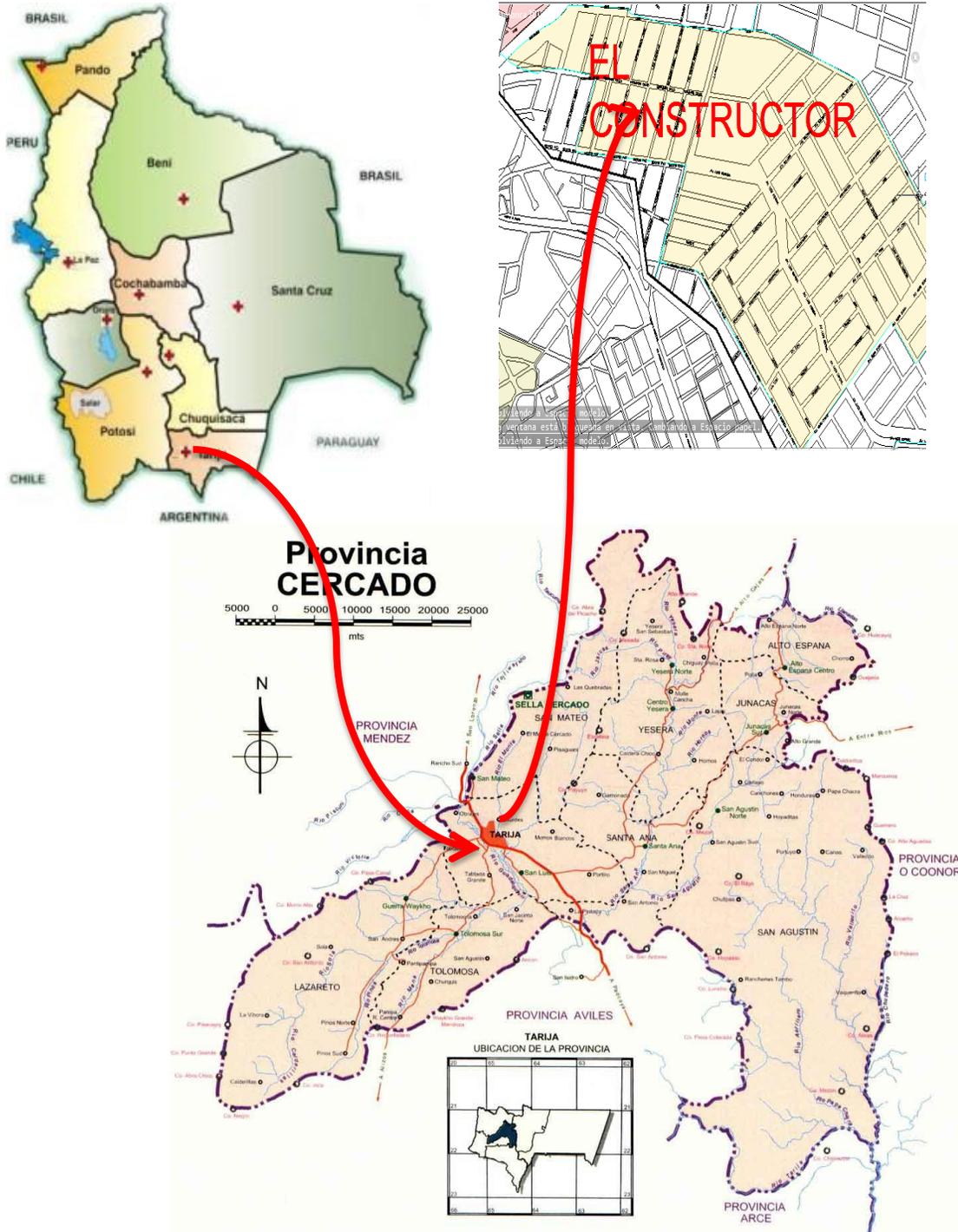
Figura 15: Ubicación de la zona de muestreo L-5



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Ubicación del barrio Constructor

El barrio Lourdes se encuentra ubicado dentro de la mancha urbana de la provincia Cercado de la ciudad de Tarija.



- MUESTRA C-1

La muestra C-1 se ubica entre la calle Hernando Siles y calle San Bernardo

E 321748

N 7619558

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 16: Ubicación de la zona de muestreo C-1



Fuente: Elaboración Propia

Figura 17: Extracción de la muestra C-1



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA C-2

La muestra C-2 se ubica entre la Avenida Luis Espinal y Avenida Itau

E 322667

N 7618820

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 18: Ubicación de la zona de muestreo C-2



Fuente: Elaboración Propia

Figura 19: Extracción de la muestra C-2



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA C-3

La muestra C-3 se ubica entre la avenida Gran Chaco y la calle Hugo Moreno Córdoba

E 323009

N 7618940

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 20: Ubicación de la zona de muestreo C-3



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA C-4

La muestra C-4 se ubica entre la calle 1905 y calle 1918

E 322740

N 7619081

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 21: Ubicación de la zona de muestreo C-4



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA C-5

La muestra C-5 se ubica entre la avenida Luis Espinal y la avenida Salinas

E 322468

N 7619218

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 22: Ubicación de la zona de muestreo C-5



Fuente: Elaboración Propia

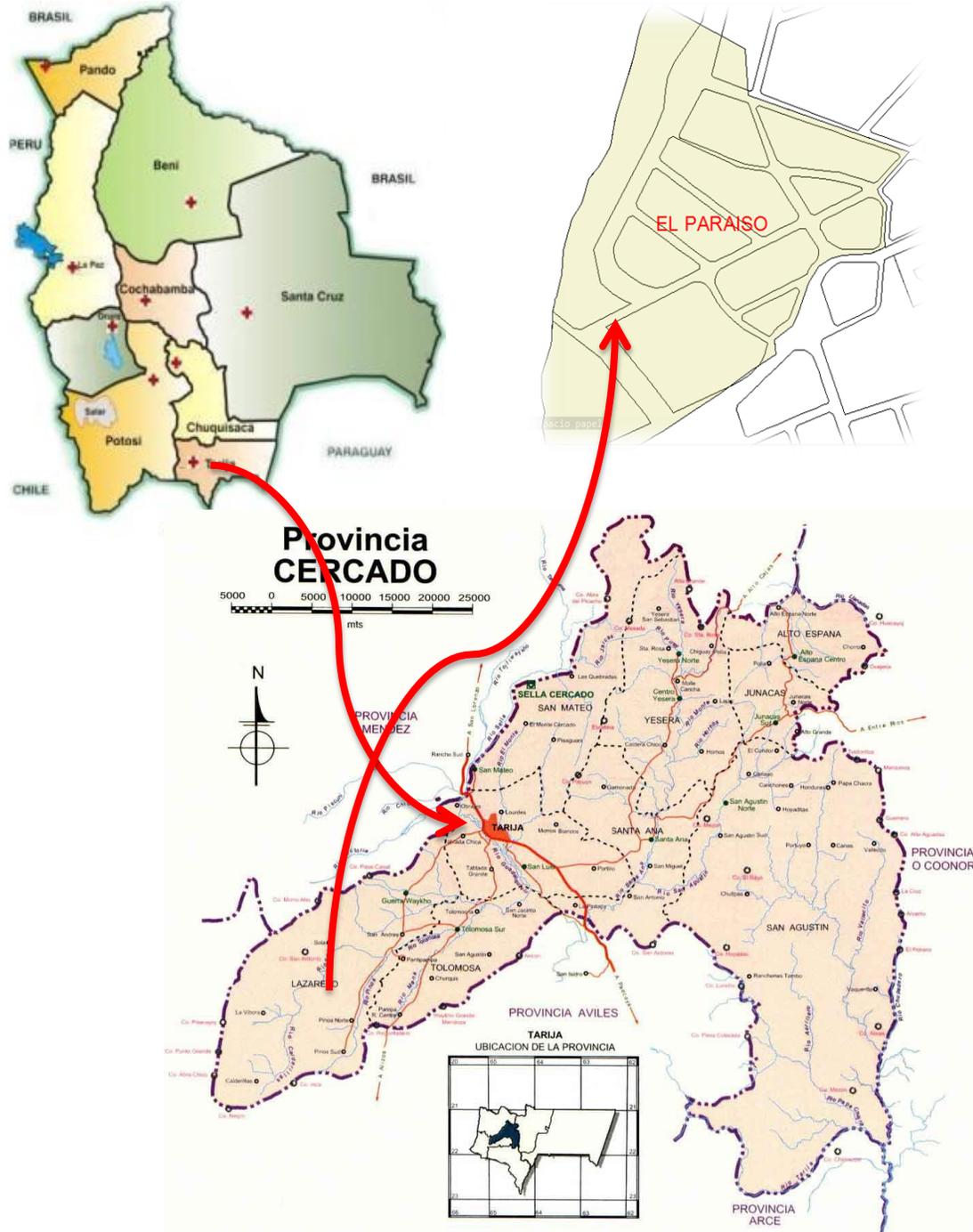
Figura 23: Extracción de la muestra C-5



Fuente: Elaboración Propia

3.3.3 Ubicación del barrio Paraíso

El barrio Paraíso se encuentra ubicado dentro de la mancha urbana de la provincia Cercado de la ciudad de Tarija.



- MUESTRA P-1

La muestra P-1 se ubica entre las calles la Retama y Alegrias

E 317637.1

N 7621133.29

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 24: Ubicación de la zona de muestreo P-1



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA P-2

La muestra P-2 se ubica entre la avenida Belgica y calle los Jasminez

E 317954.9

N 7621110

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 25: Ubicación de la zona de muestreo P-2



Fuente: Elaboración Propia

- MUESTRA P-3

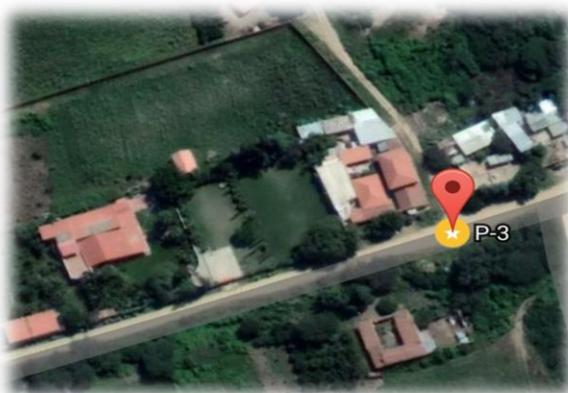
La muestra P-3 se ubica en la calle las Orquideas, con las siguientes coordenadas:

E 317611.9

N 76120745.48

Las coordenadas se mostrarán con mayor detalle en ANEXOS II

Figura 26: Ubicación de la zona de muestreo P-3



Fuente: Elaboración Propia

Figura 27: Extracción de la muestra P-3



Fuente: Elaboración Propia

3.4 OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

Se realizó una extracción representativa para poder determinar de una forma efectiva las propiedades de los suelos en estudio.

Para la extracción del material se utilizó una pala, picota, bolsas de yute y de plástico.

Se quitó el material seco y suelto de la superficie para obtener un material fresco, se excavo de una manera uniforme desde la parte superior hasta el fondo, por último se depositó el material en las bolsas para posteriormente etiquetarlas y llevarlas al laboratorio de suelos.

3.5 DENOMINACIÓN DE LAS MUESTRAS

- Muestra del barrio Lourdes:

Muestra L-1

Muestra L-2

Muestra L-3

Muestra L-4

Muestra L-5

- Muestra del barrio Constructor

Muestra C-1

Muestra C-2

Muestra C-3

Muestra C-4

Muestra C-5

- Muestra del barrio Paraíso

Muestra P-1

Muestra P-2

Muestra P-3

3.6 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos para la caracterización del suelo sin tratar es decir el suelo sin material estabilizante.

Para elegir la muestra representativa de cada barrio se realizará la caracterización física de las muestras extraídas hasta obtener el índice de plasticidad de cada muestra.

Posteriormente se realizarán los ensayos de peso específico, análisis granulométrico por medio del hidrómetro y la caracterización mecánica (Compactación y la determinación de la relación de soporte del suelo CBR) a las tres muestras representativas de cada barrio, las cuales serán tratadas con Sika Dust Seal.

Para la caracterización son necesarios los ensayos de: contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizado, determinación del peso específico, análisis granulométrico por medio del hidrómetro, determinación del límite líquido, determinación del límite plástico e índice de plasticidad, compactación y la determinación de la relación de soporte del suelo CBR.

3.6.1 Caracterización física.

Cuadro 11: Caracterización física del suelo

CARACTERIZACIÓN	ENSAYO	NORMATIVA
Física	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
	Análisis granulométrico por hidrómetro	ASTM D422
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
	Determinación del peso específico de los suelos	(ASTM D854 AASHTO T100)

Fuente: Elaboración Propia

3.6.2 Caracterización mecánica del suelo.

Cuadro 12: Caracterización mecánica del suelo

Caracterización	Ensayo	Normativa
Mecánica	Ensayo de compactación (Proctor Modificado)	AASHTO T180
	Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración Propia

3.7 PREPARACIÓN DEL SUELO

La preparación del suelo como se trata de un suelo fino cohesivo, de las zonas de donde se extrajeron la muestra se las obtuvo en forma de terrones y un poco de suelo pero en forma de grumos pequeños, lo que se hace necesario para realizar todos los ensayos que el suelo se encuentre desintegrado o suelto que pase por los tamices especificados para cada ensayo, para desintegrar los terrones, en una bandeja grande metálica se coloca en cantidades óptimas (según el tamaño de la bandeja) y con un martillo de goma o un rodillo se procede a reducir los tamaños de los terrones hasta tener un suelo completamente suelto, teniendo en cuenta de no golpear el suelo debido a que este puede sufrir alteraciones en sus partículas.

Figura 28: Tamizado del material



Fuente: Elaboración Propia

3.8 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

3.8.1 Contenido de humedad (ASTM D2216).

Es importante este ensayo, ya que determina en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo por peso.

El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la

masa de las partículas sólidas de material, necesario para obtener la humedad en los ensayos de límites.

Consiste en obtener una muestra húmeda representativa del material utilizado, colocarlo en un recipiente al horno (mejor si tiene tapa), pesar el recipiente vacío y luego el recipiente más la muestra húmeda obteniendo así un peso del material más el recipiente, luego llevarla al horno a temperatura $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) en la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente, sacar del horno y pesar nuevamente el material, obteniendo un peso seco del material más el recipiente.

Calculando el contenido de agua de la muestra así:

$$w = \frac{Pa}{Pss} * 100 (\%)$$

Dónde:

w = Contenido de humedad (%)

Pa= Peso del agua presente en el suelo (gr)

Pss= Peso del suelo después de secar al horno (gr)

3.8.2 Análisis granulométrico por tamizado método de lavado (ASTM D422 AASHTO T88).

Para este ensayo serán necesarios los tamices: N° 4 con abertura de 4,75 mm, N° 10 con abertura de 2,0 mm, N° 40 con abertura de 0,425 mm y N° 200 con abertura de 0,075mm.

Tomar una muestra representativa de suelo, registrar la cantidad exacta, hacer pasar el material por los tamices, cuidadosamente lavar con agua potable el material sobre tamiz 0,075 mm (N° 200); vacíe a una bandeja el material retenido en tamiz 0,075 mm (N° 200) y dejar que seque hasta masa constante a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Se debe registrar los pesos del material retenido en cada tamiz y lo del tamiz N° 200 su peso seco, luego calcular el porcentaje retenido en cada tamiz.

Expresar la granulometría como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicando como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y expresando el resultado para los siguientes tamices como la diferencia entre el porcentaje que pasa

en el tamiz inmediatamente anterior al de cálculo y el retenido en el tamiz de cálculo. Aproximar los porcentajes que pasan al entero más cercano.

Los resultados de la granulometría pueden expresarse en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales; en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz, obtenidos de acuerdo a lo calculado en porcentaje del retenido en cada tamiz.

Figura 29: Método del lavado



Fuente: Elaboración Propia

3.8.3 Determinación del límite líquido (ASTM D4318 AASHTO T89).

Se debe extraer una muestra de suelo aproximadamente unos 500 gramos que pasa el tamiz 0,425 mm (N° 40). Colocar la muestra en el plato; agregar agua y mezclar completamente mediante la espátula.

Colocar el aparato de límite líquido sobre una base firme, en la taza del equipo colocar una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula; la masa de suelo deberá colocarse centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base. Moldear la masa de suelo con la espátula, evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.

Figura 30: Colocado de la muestra al aparato Casa Grande



Fuente: Elaboración Propia

Enrasar y nivelar a 10mm en el punto de máximo espesor. Reincorporar el material excedente al plato de evaporación. Dividir la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. Pasar el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza.

Girar la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm., registrar el número de golpes obtenido, retirar aproximadamente 10 gr. del material que se junta en el fondo del surco; colocarlo en una cápsula de secado y determinar su humedad. Se debe realizar al menos 3 veces los mismos pasos a diferentes humedades se recomienda que debe estar entre los 15 a 40 golpes, para luego construir un gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica.

El Límite Líquido (LL) del suelo será la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

Figura 31: Determinación de límite líquido del suelo



Fuente: Elaboración Propia

3.8.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90).

Para determinar el límite plástico se debe extraer una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensayo de 500 gr. de material bajo tamiz 0,425mm (Nº 40).

Agregar agua a la muestra en un plato y mezclar uniformemente hasta obtener una masa pastosa, la cual se pueda amasar hasta que no se pegue en la mano, con la mano encima de un vidrio proceder a realizar rollitos de aproximadamente 3 mm diámetro, al llegar a este diámetro aproximado el rollito debe empezar a fisurarse, entonces se debe cortar en la parte fisurada en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pueda ser re amasado ni reconstituido. Realizar entre 3 a 5 pruebas, extrayendo de cada prueba unas 3 muestras de rollitos para pesarlos y llevarlos al horno para el secado correspondiente y determinar la humedad y con ello el porcentaje de humedad el promedio de los porcentajes de humedad si no se descarta ninguno será el Límite Plástico.

El índice de plasticidad es la diferencia del porcentaje de humedad del Límite Líquido y el Límite Plástico del mismo material analizado.

Figura 32: Determinación de límite plástico del suelo



Fuente: Elaboración Propia

3.8.5 Resultados de los ensayos de caracterización física del suelo natural y determinación de los suelos a estabilizar

- Barrio Lourdes

Cuadro 13: Resultados de los ensayos de caracterización física del suelo natural perteneciente al barrio Lourdes

N°	Granulometría				Límites			Clasificación		
	N°4	N°10	N°40	N°200	L.I.	L.p.	I.P.	AASHTO	I. Grupo	S.U.C.S.
L-1	100.00	99.47	88.91	65.32	20.28	16.16	4.12	A - 4	6	CL-ML
L-2	100.00	99.68	93.06	68.41	18.62	15.49	3.13	A - 4	7	ML
L-3	100.00	98.89	88.78	71.73	32.38	17.80	14.59	A - 6	9	CL
L-4	99.52	98.91	95.34	85.26	23.93	19.52	4.41	A - 4	8	CL ML
L-5	100.00	100.00	94.44	73.86	34.95	18.38	16.56	A - 6	10	CL

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de las prácticas se verán en el ANEXO III

Como se puede apreciar en la anterior tabla, el tipo de suelo que más se repite en el Barrio Lourdes es el suelo A-4, el cual da como resultado en tres muestras

Suelo A-4 ———> 3 muestras

Suelo A-6 ———> 2 muestras

Por lo tanto se elegirá como muestra representativa del barrio Lourdes una de las muestras que dieron como resultado según la clasificación AASHTO un suelo A-4.

Basándose en los criterios previamente propuestos se elegirá como muestra representativa del barrio Lourdes la muestra que tenga el índice de plasticidad más elevado, la cual es perteneciente a la muestra L-4 con un índice de plasticidad de 4.5.

- **Barrio Constructor**

Cuadro 14: Resultados de los ensayos de caracterización física del suelo natural perteneciente al barrio Constructor

N°	Granulometría				Límites			Clasificación		
	N°4	N°10	N°40	N°200	L.l.	L.p.	I.P.	AASHTO	I. Grupo	S.U.C.S.
C-1	100.00	96.32	86.79	73.98	28.38	17.46	10.92	A - 6	8	CL
C-2	100.00	99.96	92.42	69.32	26.98	18.45	8.53	A - 4	7	CL
C-3	100.00	98.97	90.70	72.97	29.38	16.53	12.85	A - 6	9	CL
C-4	100.00	99.57	73.92	40.43	18.77	14.61	4.16	A - 4	1	SC-SM
C-5	100.00	99.98	99.47	88.04	31.37	17.60	13.77	A - 6	10	CL

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de las prácticas se verán en el ANEXO III

En la tabla anterior se observa que el tipo de suelo que más se repite en el Barrio Constructor es el suelo A-6, el cual da como resultado en tres muestras

Suelo A-4 —> 2 muestras

Suelo A-6 —> 3 muestras

Por lo tanto se elegirá como muestra representativa del barrio Constructor una de las muestras que dieron como resultado según la clasificación AASHTO un suelo A-6.

Basándose en los criterios previamente propuestos se elegirá como muestra representativa del barrio Constructor la muestra que tenga el índice de plasticidad más elevado, la cual es perteneciente a la muestra C-5 con un índice de plasticidad de 13.8.

- **Barrio Paraíso**

Cuadro 15: Resultados de los ensayos de caracterización física del suelo natural perteneciente al barrio Paraíso

N°	Granulometría				Límites			Clasificación		
	N°4	N°10	N°40	N°200	L.l.	L.p.	I.P.	AASHTO	I. Grupo	S.U.C.S.
P-1	100.00	99.37	85.82	66.19	29.02	16.65	12.38	A - 6	7	CL
P-2	100.00	98.69	83.33	63.34	35.27	20.87	14.40	A - 6	7	CL
P-3	100.00	88.71	74.91	66.20	40.90	21.15	19.75	A - 7 - 6	10	CL

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de las prácticas se verán en el ANEXO III

En la tabla anterior podemos observar que el tipo de suelo que más se repite en el Barrio Paraíso es el suelo A-6, el cual da como resultado en 2 muestras:

Suelo A-6 —→ 2 muestras

Suelo A-7-6 —→ 1 muestras

Debido a que la muestra a ser tratada del barrio Constructor será una muestra con una clasificación del suelo A-6 y tomando en cuenta que para obtener mejores conclusiones del presente trabajo y tener más tipos de suelos estabilizados con Sika Dust Seal con la finalidad de conocer cómo actúa el material estabilizante en estos, se optará como muestra representativa del Barrio Paraíso la muestra de suelo A-7-6 cuyo índice de plasticidad es el más elevado de todas las muestras extraídas del presente barrio, teniendo un índice de plasticidad de 19.8

La muestra representativa del barrio Paraíso es la Muestra P-3.

3.8.6 Resumen de los tipos de suelo a estabilizar

En la siguiente tabla se presentan los suelos a ser tratados con Sika Dust Seal

Cuadro 16: Suelos a ser tratados con SIKA DUST SEAL

Barrios	Designación	Granulometría				Límites			Clasificación		
		Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	L.l.	L.p.	I.P.	AASHTO	I. Grupo	S.U.C.S.
Lourdes	L-4	99.52	98.91	95.34	85.26	23.93	19.52	4.41	A - 4	8	CL ML
Constructor	C-5	100.00	99.98	99.47	88.04	31.37	17.60	13.77	A - 6	10	CL
Paraíso	P-3	100.00	88.71	74.91	66.20	40.90	21.15	19.75	A - 7 - 6	10	CL

Fuente: Elaboración Propia

Se realizarán los ensayos de peso específico, análisis granulométrico por medio del hidrómetro y la caracterización mecánica (Compactación y CBR) a estas tres muestras para posteriormente realizar la comparación de la influencia de Sika Dust Seal en sus propiedades físicas y mecánicas de estos suelos.

3.8.7 Determinación del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T 100)

Este ensayo se realiza en dos etapas la primera etapa consiste en la calibración del frasco y la segunda el ensayo con la muestra de suelo.

3.8.7.1 Calibración de frascos volumétricos

Se procede a enjuagar el matraz para eliminar la grasa que puede tener adherida en su interior, posteriormente se enjuaga de nuevo con agua destilada.

Se determina el peso del matraz seco y limpio. A continuación se llena el frasco con agua destilada hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración del 50% de su capacidad, luego se introduce el frasco en un baño María caliente y se somete al incremento de calor.

El baño María debe aplicarse hasta que la temperatura en el centro del frasco este alrededor de unos 60°C. Se saca el frasco del baño María y se complementa el agua a temperatura ambiente hasta 5 mm. antes de la marca de enrase para poder llenarlo con la pipeta hasta el 100% de su capacidad.

Se pesa el frasco con el agua hasta el enrase, posteriormente para bajar la temperatura del agua, se debe hacer enfriar el frasco en baño María frío (colocar hielo en una bandeja e introducir el matraz en el centro).

Realizar cinco pesadas del frasco a cinco diferentes temperaturas, el rango de temperaturas leídas tiene que ser entre 30 a 15 °C.

Se elabora una curva de calibración de pesos obtenidos versus temperatura la cual brindara información para la realización del ensayo del peso específico de un suelo.

3.8.7.2 Determinación del peso específico de los suelos

Para determinar el peso específico de los suelos se debe pesar 80 gramos de suelo húmedo y colocar el suelo en un plato posteriormente añadir agua y proceder a mezclar hasta formar una pasta suave. Luego se introduce la pasta con mucho cuidado en un frasco previamente calibrado y se llena este con agua hasta el 50% de su capacidad.

Se extrae el aire atrapado dentro de los suelos moviendo el frasco con mucho cuidado. Posteriormente se somete el frasco de agua con suelo a efectos de temperatura dentro de un baño María, hasta que alcance una temperatura de 60 °C en el centro del frasco, luego se llena el frasco con agua a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase.

Se pesa el frasco y se mide la temperatura en el centro del frasco volumétrico.

Se somete a un enfriamiento del frasco para repetir el proceso unas tres veces a diferentes temperaturas en un rango de 30 a 15 °C.

3.8.8 Resultados de los ensayos de peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T 100)

Cuadro 17: Resultados de los ensayos de peso específico del suelo natural

Barrios	Peso específico relativo
Barrio Lourdes	2.62
Barrio Constructor	2.56
Barrio Paraíso	2.53

Fuente: Elaboración Propia

3.8.9 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D422)

Se debe preparar 125 ml. De solución (agua con deflocutante), el porcentaje de deflocutante es aproximado en un 4% en peso de lo que pesa 1000 ml. De agua.

La muestra se coloca en un recipiente y se debe mezclar con los 125 ml. De solución al 4% de deflocutante.

Figura 33: Muestra con deflocutante



Fuente: Elaboración Propia

Se deja la muestra reposar durante 24 horas, luego se la transfiere a un vaso donde se pueda batir el material, en este vaso se puede aumentar agua hasta $\frac{2}{3}$ del volumen total del vaso para posteriormente comenzar el batido durante un periodo de 5 minutos.

Depositar el contenido del vaso de mezclado a una probeta graduada (que se llamará probeta de ensayo), y se aumenta agua hasta llegar a los 1000 ml.

Se preparará una probeta patrón de control de 1000 ml. Que contenga 125 ml de solución dispersante al 4%.

La probeta de ensayo se tapaná con un tapón (utilizar la palma de la mano), para evitar que durante la agitación de la misma tenga pérdidas, la agitación tiene que ser alrededor de 1 minuto. Luego de sacudir la probeta se la coloca sobre la mesa y se introduce el hidrómetro tomando lecturas en los siguientes intervalos de tiempo 1,2,3,4 minutos, realizando igualmente lecturas del termómetro.

Figura 34: Lectura del hidrómetro

Fuente: Elaboración Propia

Se coloca el hidrómetro y el termómetro en un recipiente de control (el cual debe encontrarse a una temperatura que no difiera en más de 1 °C del suelo). Tomar una lectura para corrección de menisco en el hidrómetro dentro del cilindro de control.

Luego, introducir nuevamente el hidrómetro a la probeta de ensayo y realizar lecturas a los: 5, 10, 30, 60, 120, 250 y 1.440 minutos.

Antes de proceder con los cálculos, las lecturas de hidrómetro deberán ser corregidas por menisco, por temperatura, por defloculante y punto cero.

Luego realizar los siguientes cálculos: lectura del hidrómetro corregida, cálculo del diámetro de las partículas (D), cálculo del porcentaje más fino.

3.8.10 Resultados de los ensayos del análisis granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D422)

Cuadro 18: Resultados de los ensayos del análisis granulométrico por medio del hidrómetro del suelo natural

Barrios	Hidrómetro	
	Arcilla	Limo
	%	
Barrio Lourdes	3.63	81.67
Barrio Constructor	11.57	76.43
Barrio Paraíso	18.43	47.77

Fuente: Elaboración Propia

3.8.11 Ensayo de compactación (Proctor modificado) (AASHTO T180)

Se debe preparar el suelo aproximadamente 20 kg. desintegrando los terrones y grumos hasta que pase el tamiz N° 4, y desechar lo retenido en éste tamiz, una vez preparado la muestra se debe calcular su contenido de humedad, antes de compactarlo.

Dividir el materiales en cinco partes iguales de 5000 gramos cada uno, depositar en fuentes y lavadores ya que en cada uno se incrementará agua en diferentes porciones; para suelos cohesivos se recomienda comenzar con un porcentaje de humedad variando entre porcentajes de 6% a 17%, para ésto se debe aplicar el incremento de la humedad.

Figura 35: Homogeneización de la muestra a compactar



Fuente: Elaboración Propia

Se pesa el molde con la base y sin collarín y se determina su volumen, una vez calculado los porcentajes requeridos de humedad se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo mezclando y homogeneizando la muestra, para luego introducir al molde compuesto con su extensión o collarín, en cinco capas iguales compactando cada capa a 56 golpes. Una vez completada la compactación se retira el collarín y se enraza con la regla metálica hasta dejar una superficie lisa hasta la altura del molde, luego se pesa el molde con su base con el suelo compactado y enrazado, registrando en la planilla de cálculos. Seguidamente se retira el molde de su base y se extrae tres muestras del corazón del suelo compactado, para determinar el contenido de humedad real del suelo compactado. Luego de esto, realizar los cálculos y graficar la curva de densidades en el

eje de las ordenadas y porcentaje de humedad en el eje de las abscisas, para obtener una ecuación y obtener la humedad óptima que será donde se dé la máxima densidad de compactación.

Figura 36: Compactación del material



Fuente: Elaboración Propia

3.8.12 Resultados de los ensayos de compactación del suelo natural

Cuadro 19: Resultados de los ensayos de compactación del suelo natural

Barrios	Proctor T-180	
	D.max. (Kg/m ³)	H.op. (%)
Barrio Lourdes	1921.80	11.90
Barrio Constructor	1914.76	12.28
Barrio Paraíso	1904.18	13.60

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de las prácticas se verán en el ANEXO III

3.8.13 Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como relación de soporte de california (CBR). El ensayo se realiza

normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Figura 37: Determinación de las propiedades expansivas del suelo



Fuente: Elaboración Propia

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de sub-rasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares. Con el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima compactada seca de acuerdo con los Métodos Proctor, compactar al menos 3 probetas en un rango de 90% a 100% de la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente. Para cada molde colocar el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro grueso sobre el espaciador. Compactar cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde, en un número de capas igual al de las probetas usadas en el ensayo de humedad - densidad. Cada probeta se debe compactar con distinta energía de tal manera que la densidad en la cual se desee determinar la razón de soporte quede entre las densidades de dos probetas.

Si las muestras van a ser sometidas a inmersión, determinar el contenido de humedad al comienzo y al final del procedimiento de compactación (2 muestras). Cada una de ellas debe pesar como mínimo 500g. Si las muestras no se van a someter a inmersión, obtener la muestra para la determinación de humedad después de efectuar la penetración, luego

retira el collar, sacar la placa perforada y el disco espaciador y pesar el molde con el suelo compactado.

Colocar un disco de papel filtro grueso sobre la placa base perforada, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo compactado en contacto con el papel filtro.

Figura 38: Compactación de moldes CBR



Fuente: Elaboración Propia

Colocar el vástago ajustable y la placa perforada sobre la probeta de suelo compactado y aplicar las cargas hasta producir una sobrecarga igual a la ejercida por la estructura del pavimento sobre el material en estudio, redondeando a múltiplos de 2,27Kg. (5 lb). En ningún caso debe ser menor que 4,54Kg. (10 lb)

Aplicar la carga en el pistón de penetración de manera que la velocidad sea de 1,27 mm/min. Anotar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración: 0,64; 1,27; 1,91; 2,54; 3,18; 3,81; 4,45; 5,08; 7,62; 10,16 y 12,7mm. Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce, si esto ocurre para una penetración menor que 12,7mm. El ensaye debe realizarse hasta alcanzar una penetración mínima de 7,62mm (0,300pulgadas). Luego sacar el suelo del molde y determinar su humedad considerando la totalidad de la muestra. Luego con los datos procesados y los resultados de éstos, se graficará la curva tensión penetración el cálculo de la razón de soporte.

Figura 39: Determinación de la resistencia a la penetración



Fuente: Elaboración Propia

3.8.14 Resultados de los ensayos de la relación de soporte del suelo natural en laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

Cuadro 20: Relación de soporte del suelo natural (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

Barrios	CBR		Exp. (%)
	100%	95%	
Barrio Lourdes	4.68	3.18	0.96
Barrio Constructor	3.36	2.45	3.66
Barrio Paraíso	2.04	1.77	4.79

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento y la descripción de las prácticas se verán en el ANEXO III

CAPÍTULO IV
DISEÑO, EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE
RESULTADOS

4. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez determinado todas las características de los suelos naturales, se desarrolla el estudio de la mezcla suelo con el producto Sika Dust Seal el cual es analizado a partir de los ensayos de resistencia soporte de california (CBR) y también con la clasificación de este material, determinando en base a estas prácticas las características que obtendrán los suelos mezclados con los diferentes porcentajes de Sika Dust Seal; obteniendo el porcentaje recomendable para los tres tipos de suelos a utilizar para la estabilización.

Por lo tanto lo que se busca es mejorar ciertas propiedades del suelo para mejorar su reacción frente a acciones mecánicas y climáticas de manera que esta alternativa pueda ejercer un comportamiento adecuada para una subrasante.

Para esto se someterá a cada muestra con 4 diferentes porcentajes de Sika Dust Seal para determinar cómo varia su evolución entre una y otra prueba y con el análisis de todas las mezclas realizadas determinar un valor recomendable.

Para el porcentaje de Sika Dust Seal se procedió a dar rangos de 0.25% al 1% para hallar el porcentaje recomendable de la mezcla.

3.9 DOSIFICACIÓN

La finalidad de la dosificación es determinar la cantidad de Sika Dust Seal capaz de garantizar una mezcla con permanencia de sus características mejoradas.

Este método propone una dosificación experimental en donde se utiliza varios contenidos del producto a utilizar para la preparación de las mezclas, para posteriormente someterlas a ensayos. El análisis de resultados determina o indica el menor de ellos que es capaz de estabilizar el suelo.

Entonces la dosificación propuesta son cuatro porcentajes diferentes que serán aplicados a cada una de las muestras. Los porcentajes están referidos siempre al peso del suelo seco, y son los siguientes:

BARRIO LOURDES

Mezcla 1 A-4 : Suelo-0.25% Sika Dust Seal

Mezcla 2 A-4: Suelo-0.50% Sika Dust Seal

Mezcla 3 A-4 : Suelo-0.75% Sika Dust Seal

Mezcla 4 A-4 : Suelo-1.00% Sika Dust Seal

BARRIO CONSTRUCTOR

Mezcla 1 A-6 : Suelo-0.25% Sika Dust Seal

Mezcla 2 A-6: Suelo-0.50% Sika Dust Seal

Mezcla 3 A-6 : Suelo-0.75% Sika Dust Seal

Mezcla 4 A-6: Suelo-1.00% Sika Dust Seal

BARRIO PARAÍSO

Mezcla 1 A-7-6 : Suelo-0.25% Sika Dust Seal

Mezcla 2 A-7-6: Suelo-0.50% Sika Dust Seal

Mezcla 3 A-7-6: Suelo-0.75% Sika Dust Seal

Mezcla 4 A-7-6: Suelo-1.00% Sika Dust Seal

3.10 PREPARACIÓN DE MEZCLAS VARIANDO PORCENTAJES DE SIKA DUST SEAL.

Después de haber obtenido los resultados de la caracterización de los suelos naturales se procederá a la mezcla del suelo con Sika Dust Seal en porcentajes de (**0.25 %**, **0.50%**, **0.75%** y **1.00%**), luego del mezclado se realiza los mismos ensayos que se ejecutaron en la caracterización de los suelos naturales, donde se obtendrá resultados que posteriormente serán analizados.

Figura 40: Preparación de la muestra Suelo - Sika Dust Seal



Fuente: Elaboración Propia

Para la preparación de la mezcla suelo-Sika Dust Seal, es necesario que el suelo se encuentre suelto y pase por los tamices especificados para cada ensayo, es importante conocer el contenido de humedad a la que se encuentra el suelo antes de la adición del aditivo, esto puede conocerse por diferentes métodos, se trabajó a partir del contenido de humedad a la que se encontraba el suelo. Conocido el contenido de humedad en porcentaje se procede a determinar a cuánto equivale este porcentaje en los 5 kg. del suelo, para luego restar este peso que sería el del agua presente en el suelo para así obtener el peso del suelo seco.

Las siguientes fórmulas indican el procedimiento para obtener la cantidad de Sika Dust Seal de acuerdo al peso de suelo seco.

Contenido de humedad

$$w = \frac{Pa}{P_{SS}} * 100 \text{ (\%)}$$

Dónde:

w= Contenido de humedad en porcentaje (%)

Pa= Peso del agua presente en el suelo (gr)

Pss= Peso del suelo después de secar al horno (gr)

Peso del agua presente en la muestra de suelo

$$W = \frac{w * Pm}{100} \text{ (gr)}$$

Dónde:

W= Peso del agua presente en el suelo para una muestra de peso Pm (gr)

Pm= Peso de la muestra de suelo (gr)

w= Contenido de humedad (%)

Peso del suelo seco de la muestra

$$P_{SSm} = Pm * W \text{ (gr)}$$

Dónde:

Pssm= Peso suelo seco de la muestra (gr)

Pm= Peso de la muestra (gr)

W= Peso del agua presente en la muestra de suelo (gr)

Cantidad de Sika Dust Seal referida al peso de suelo seco de la muestra

Para realizar el cálculo de la cantidad del aditivo a añadir debe estar referida siempre al peso del suelo seco, se parte sabiendo al porcentaje que se desea dosificar, en este caso será una dosificación del 0.25%, 0.50%, 0.75% y 1.00%.

$$Cc = \frac{d * P_{ssm}}{100 * D_{S.D.S.}} (lts)$$

Dónde:

Cc= Cantidad de aditivo a añadir (lt)

d= Dosificación del Sika Dust Seal (%)

P_{SSM}= Peso del suelo seco de la muestra en (Kg)

D_{S.D.S.}= Densidad de Sika Dust Seal en (Kg/lt)

3.11 EVALUACIÓN DEL SUELO- SIKA DUST SEAL

La evaluación al suelo-Sika Dust Seal se lo realiza en base a los siguientes ensayos:

Cuadro 21: Ensayos para la evaluación (suelo – Sika Dust Seal)

Ensayo	Normativa
Contenido de humedad	ASTM D2216
Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
Análisis granulométrico por hidrómetro	ASTM D422
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Ensayo de compactación método Proctor modificado.	(AASHTO T180)
Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración Propia

3.11.1 Caracterización del Suelo - Sika Dust Seal

La caracterización en base al análisis granulométrico por tamizado, análisis granulométrico por hidrómetro, límite líquido, límite plástico y compactación tiene el mismo procedimiento que se dio a conocer en parte de caracterización de los suelos naturales.

3.11.2 Determinación de la relación de soporte del suelo - Sika Dust Seal

(CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193)

Para determinar el CBR del suelo-Sika Dust Seal se realiza de acuerdo al método tradicional.

Procedimiento del ensayo

- a) Con la dosificación establecida de 0.25%, 0.50%, 0.75% y 1% se prepara el material para cada tipo de suelo, calculando la cantidad del aditivo y suelo que se necesita en cada ensayo.

Figura 41: Dosificación de Sika Dust Seal



Fuente: Elaboración Propia

- b) Con el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima compactada de acuerdo al ensayo de proctor, se compacta 3 moldes o probetas a la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente.

- c) Se mezcla homogéneamente con agua cada una de las tres muestras de suelo-Sika Dust Seal por ensayar, agregando la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima determinada en “Relación humedad-densidad”. Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo y el aditivo, se extrae una muestra del suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado del CBR.
- d) Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro sobre el espaciador.
- e) Compactar cada una de las porciones de suelo y el aditivo húmedo en el molde, en un número de 5 capas. Cada probeta se debe compactar con distinta energía, de 12, 25 y 56 golpes. Luego se retira el collar, y se enrasa cuidadosamente el suelo compactado con una regla al nivel del borde del molde.

Figura 42: Compactación de moldes CBR Suelo – Sika Dust Seal



Fuente: Elaboración Propia

- f) Posteriormente se saca el disco espaciador y sobre la base perforada se coloca papel filtro, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo y aditivo compactado en contacto con el papel filtro y pesar.
- g) Finalmente se coloca el vástago ajustable sobre el molde de muestra compactada, para poder controlar la expansión que sufrirá el suelo- Sika Dust Seal durante el tiempo de inmersión.

Figura 43: Muestra sumergida a un nivel de agua constante



Fuente: Elaboración Propia

- h) Dejar sumergidos durante 5 días los moldes. Durante este período se debe mantener la muestra sumergida a un nivel de agua constante. Una vez concluido el tiempo de inmersión se retira los moldes del agua dejando drenar la probeta durante 15 min. Retirar el vástago con las cargas, para pesar el molde con el suelo y aditivo compactado después de la inmersión.

Figura 44: Drenado de probetas



Fuente: Elaboración Propia

3.12 RESUMEN DE RESULTADOS (ESTABILIZADOS)

Suelo A-4(8) - Barrio Lourdes

Se presenta la siguiente tabla para la clasificación del suelo perteneciente al Barrio Lourdes:

Cuadro 22: Resumen de la clasificación del suelo del barrio Lourdes a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Granulometría				Límites			Peso Específico	Hidrómetro		Clasificación		
	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	L.l.	L.p.	LP.		Arcilla(%)	Limo(%)	AASHTO	IGrupo	S.U.C.S.
0%	99.52	98.91	95.34	85.26	23.93	19.52	4.41	2.62	3.63	81.67	A-4	8	CL ML
0.25%	99.52	98.91	95.34	85.26	22.58	18.35	4.23	2.62	3.63	81.67	A-4	8	CL ML
0.50%	99.52	98.91	95.34	85.26	20.96	16.97	3.99	2.62	3.63	81.67	A-4	8	ML
0.75%	99.52	98.91	95.34	85.26	20.13	16.25	3.89	2.62	2.83	82.47	A-4	8	ML
1.00%	99.52	98.91	95.34	85.26	19.27	15.67	3.59	2.62	3.63	81.67	A-4	8	ML

Fuente: Elaboración Propia

En el cuadro 22 observamos que en valores de hidrómetro para las muestras estabilizadas solo se realizó este ensayo para el porcentaje recomendable de aditivo, se efectuó de la misma manera para el ensayo de granulometría por el método del lavado pero a diferencia que en el análisis hidrométrico, en la granulometría no surgieron cambios al añadirle aditivo al suelo tratado.

Con el suelo clasificado se describe a continuación las características según su clasificación:

Cuadro 23: Descripción de la clasificación del suelo del barrio Lourdes a distintos porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Clasificación y descripción		
	S.U.C.S	AASHTO	Descripción
0%	CL-ML	A-4(8)	Suelos limos inorgánicos de baja comprensibilidad con presencia de arcillas inorgánicas
0.25%	CL-ML	A-4(8)	Suelos limos inorgánicos de baja comprensibilidad con presencia de arcillas inorgánicas
0.50%	ML	A-4(8)	Limos inorgánicos de baja a mediana comprensibilidad
0.75%	ML	A-4(8)	Limos inorgánicos de baja a mediana comprensibilidad
1.00%	ML	A-4(8)	Limos inorgánicos de baja a mediana comprensibilidad

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta las características mecánicas del suelo A-4(8) perteneciente al Barrio Lourdes:

Cuadro 24: Resumen de las características mecánicas del suelo del barrio Lourdes a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Proctor T-180		CBR		Expansión (%)
	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)	100%	95%	
0%	1921.80	11.90	4.68	3.18	0.96
0.25%	1936.14	11.55	4.69	3.66	0.91
0.50%	1945.90	11.03	5.64	4.15	0.81
0.75%	1950.59	10.54	12.66	9.16	0.51
1.00%	1957.92	9.99	19.27	12.96	0.43

Fuente: Elaboración Propia

Se analizará los resultados obtenidos en el siguiente subtítulo.

Suelo A-6(10) - Barrio Constructor

Se presenta la siguiente tabla para la clasificación del suelo perteneciente al Barrio Constructor:

Cuadro 25: Resumen de la clasificación del suelo del barrio Constructor a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Granulometría				Límites			Peso Específico	Hidrómetro		Clasificación		
	N°4	N°10	N°40	N°200	L.I.	L.p.	IP.		Arcilla(%)	Limo(%)	AASHTO	IGrupo	S.U.C.S.
0%	100.00	99.98	99.47	88.04	31.37	17.60	13.77	2.55	11.57	76.43	A - 6	10	CL
0.25%	100.00	99.98	99.47	88.04	28.70	17.42	11.28	2.55	11.57	76.43	A - 6	9	CL
0.50%	100.00	99.98	99.47	88.04	27.51	17.43	10.08	2.55	8.89	79.11	A - 4	8	CL
0.75%	100.00	99.98	99.47	88.04	26.54	16.73	9.81	2.55	11.57	76.43	A - 4	8	CL
1.00%	100.00	99.98	99.47	88.04	25.61	16.20	9.41	2.55	11.57	76.43	A - 4	8	CL

Fuente: Elaboración Propia

En el cuadro 25 observamos que en valores de hidrómetro para las muestras estabilizadas solo se realizó este ensayo para el porcentaje recomendable de aditivo, se efectuó de la misma manera para el ensayo de granulometría por el método del lavado pero a diferencia que en el análisis hidrométrico, en la granulometría no surgieron cambios al añadirle aditivo al suelo tratado.

Con el suelo clasificado se describe a continuación las características según su clasificación:

Cuadro 26: Descripción de la clasificación del suelo del barrio Constructor a distintos porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Clasificación y descripción		
	S.U.C.S	AASHTO	Descripción
0%	CL	A - 6 (10)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
0.25%	CL	A - 6 (9)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
0.50%	CL	A - 4 (8)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
0.75%	CL	A - 4 (8)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
1.00%	CL	A - 4 (8)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta las características mecánicas del suelo A-6(10) perteneciente al Barrio Constructor:

Cuadro 27: Resumen de las características mecánicas del suelo del barrio Constructor a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Proctor T-180		CBR		Expansión (%)
	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)	100%	95%	
0%	1914.76	12.28	3.36	2.45	3.66
0.25%	1933.12	11.89	3.97	2.87	3.44
0.50%	1939.49	11.28	4.62	3.57	3.13
0.75%	1941.92	10.82	6.75	5.06	2.77
1.00%	1947.80	10.53	8.69	6.87	2.48

Fuente: Elaboración Propia

Se analizará los resultados obtenidos en el siguiente subtítulo.

Suelo A-7-6(10) - Barrio Paraíso

Se presenta la siguiente tabla para la clasificación del suelo perteneciente al Barrio Paraíso:

Cuadro 28: Resumen de la clasificación del suelo del barrio Paraíso a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Granulometría				Límites			Peso Específico	Hidrómetro		Clasificación		
	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	L.I.	L.p.	LP.		Arcilla(%)	Limo(%)	AASHTO	IGrupo	S.U.C.S.
0%	100.00	88.71	74.91	66.20	40.90	21.15	19.75	2.53	18.43	47.77	A - 7 - 6	10	CL
0.25%	100.00	88.71	74.91	66.20	39.00	21.06	17.94	2.53	18.43	47.77	A - 6	9	CL
0.50%	100.00	88.71	74.91	66.20	38.43	20.75	17.68	2.53	18.43	47.77	A - 6	9	CL
0.75%	100.00	88.71	74.91	66.20	37.63	20.59	17.05	2.53	18.43	47.77	A - 6	9	CL
1.00%	100.00	88.71	74.91	66.20	36.09	20.13	15.96	2.53	14.34	51.86	A - 6	8	CL

Fuente: Elaboración Propia

En el cuadro 28 observamos que en valores de hidrómetro para las muestras estabilizadas solo se realizó este ensayo para el porcentaje recomendable de aditivo, se efectuó de la misma manera para el ensayo de granulometría por el método del lavado pero a diferencia que en el análisis hidrométrico, en la granulometría no surgieron cambios al añadirle aditivo al suelo tratado.

Con el suelo clasificado se describe a continuación las características según su clasificación:

Cuadro 29: Descripción de la clasificación del suelo del barrio Paraíso a distintos porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Clasificación y descripción		
	S.U.C.S	AASHTO	Descripción
0%	CL	A - 7 - 6 (10)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
0.25%	CL	A - 6 (9)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
0.50%	CL	A - 6 (9)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
0.75%	CL	A - 6 (9)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad
1.00%	CL	A - 6 (8)	Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad

Fuente: Elaboración Propia

Se presenta las características mecánicas del suelo A-7-6(10) perteneciente al Barrio Paraíso:

Cuadro 30: Resumen de las características mecánicas del suelo del barrio Paraíso a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Proctor T-180		CBR		Expansión (%)
	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)	100%	95%	
0%	1904.18	13.60	2.04	1.77	4.79
0.25%	1912.09	13.00	2.33	2.12	3.90
0.50%	1921.33	12.17	2.74	2.24	3.28
0.75%	1931.46	11.86	3.17	2.49	3.06
1.00%	1934.33	11.70	4.19	3.12	2.80

Fuente: Elaboración Propia

Se analizará los resultados obtenidos en el siguiente subtítulo.

3.13 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE SUELO-SIKA DUST SEAL

Analizaremos el comportamiento del suelo con la adición del aditivo a los distintos porcentajes que se utilizó. Se analizarán la prueba del hidrómetro, los Límites de Consistencia, Compactación y C.B.R.

4.5.1. Análisis de los ensayos de suelo A-4(8) – Sika Dust Seal (barrio Lourdes)

Para el análisis de los ensayos de muestras tratadas con aditivo se priorizará el ensayo de California Bearing Ratio debido a la gran importancia que tienen los valores obtenidos mediante dicho ensayo, ya que tales valores determinarán el porcentaje recomendable de Sika Dust Seal para cada muestra de suelo, por lo tanto se comenzará analizando este sustancial ensayo.

4.5.1.1. California Bearing Ratio

Cuadro 31: Valores de CBR del suelo A-4(8) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

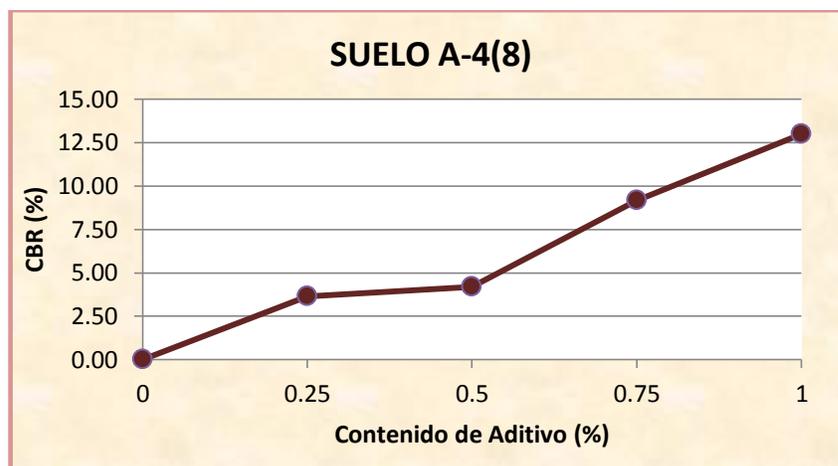
% de aditivo	CBR	
	100%	95%
0%	4.68	3.18
0.25%	4.69	3.66
0.50%	5.64	4.15
0.75%	12.66	9.16
1.00%	19.27	12.96

Fuente: Elaboración Propia

El valor de soporte de los suelos, se ve influenciado significativamente con la adición del aditivo en el suelo.

A continuación se presenta una gráfica de C.B.R. versus contenido de aditivo

Figura 45: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en el CBR del suelo A-4(8) del barrio Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

La influencia del aditivo en los valores de CBR del suelo A-4(8) se aprecian en la Figura 45, en la cual se observa un incremento sustancial que ocurre en el soporte del suelo entre los valores de 0.75 y 1 % de aditivo con respecto al CBR natural que presenta dicho suelo.

Tomando en cuenta los costos que representa añadir más estabilizante, es decir un mayor porcentaje de aditivo ya que valores mayores resultaría en una obra antieconómica lo cual no es el propósito de este trabajo; se elige como porcentaje recomendable para esta muestra de suelo A-4(8) al 0.75% de aditivo con CBR 9.2% debido a que con este valor de CBR se cumple satisfactoriamente con la norma y características de calidad para un suelo adecuado para una subrasante.

4.5.1.2. Expansión o hinchamiento

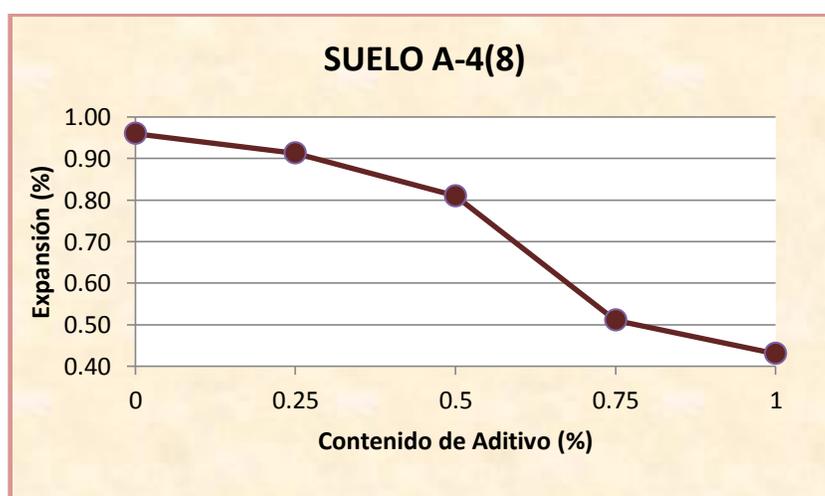
Cuadro 32: Expansión del suelo A-4(8) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Expansión (%)
0%	0.96
0.25%	0.91
0.50%	0.81
0.75%	0.51
1.00%	0.43

Fuente: Elaboración Propia

Se expresan los valores en la siguiente gráfica de expansión versus porcentaje de aditivo

Figura 46: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la expansión del suelo A-4(8) del barrio Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 46 se puede observar que en el suelo A-4(8) la expansión del suelo disminuye significativamente con la adición del aditivo.

Se puede apreciar que la expansión se reduce notablemente para el valor de 0.75% de aditivo.

En el caso de este suelo su expansión inicial era pequeña pero aun así la expansión se redujo aún más con la mezcla del aditivo.

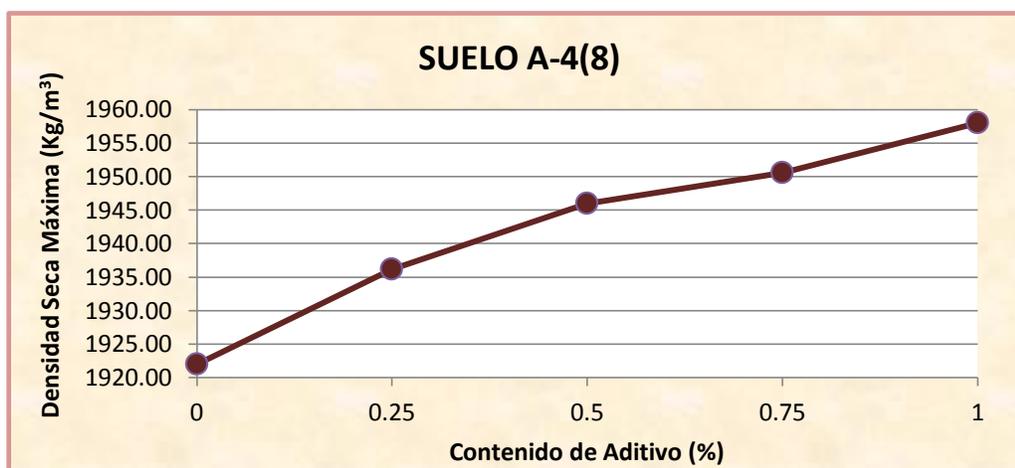
4.5.1.3. Compactación

Cuadro 33: Compactación del suelo A-4(8) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Proctor T-180	
	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)
0%	1921.80	11.90
0.25%	1936.14	11.55
0.50%	1945.90	11.03
0.75%	1950.59	10.54
1.00%	1957.92	9.99

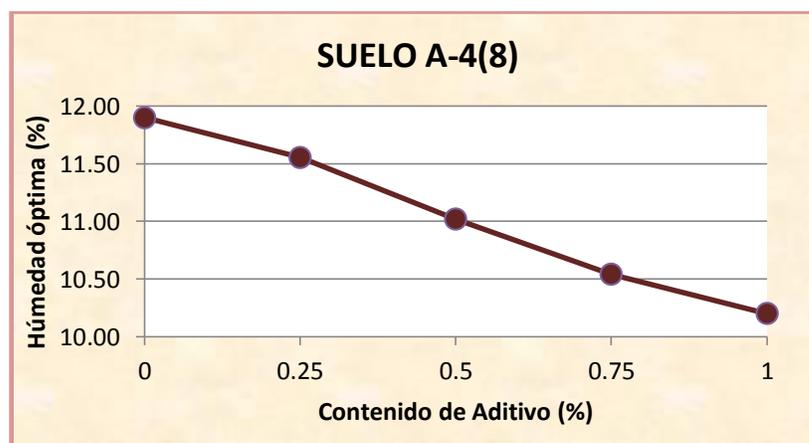
Fuente: Elaboración Propia

Figura 47: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la densidad máxima del suelo A-4(8) del barrio Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

Figura 48: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la humedad óptima del suelo A-4(8) del barrio Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar la alteración que sufre la densidad máxima de compactación del suelo con la mezcla de aditivo.

Se observa que en el suelo A-4(8) la densidad seca máxima aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.

Con la adición del porcentaje recomendable para este tipo de suelo, se logra aumentar la densidad seca máxima de 1921.80 kg/m^3 en el material sin estabilizar, hasta 1950.59 Kg/m^3 en el material estabilizado.

Esto significa un aumento en el peso seco del suelo tratado con el aditivo lo que se reflejara en una mejor compactación.

Por otro lado en la humedad óptima del suelo al ser estabilizado se observa una tendencia a la reducción, este efecto se debe al rechazo del agua que el aditivo provoca en los suelos tratados.

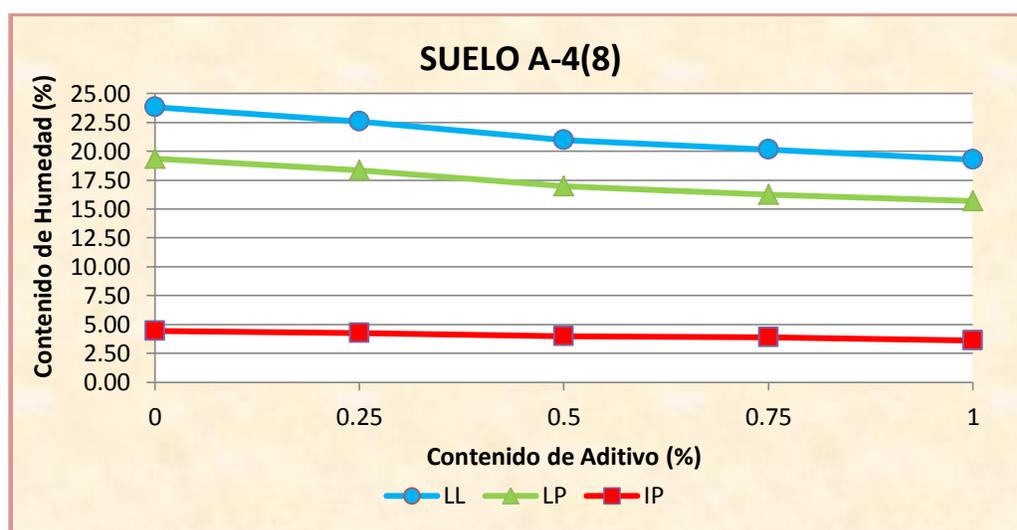
Se observa que en el suelo A-4(8) la humedad óptima reduce de 11.9% en el material sin estabilizar, hasta 10.5% con la adición de 0.75% de aditivo.

4.5.1.4.Límites de consistencia

Las pruebas de límites de consistencia estabilizados fueron realizadas para cada punto de aditivo. El resumen de resultados se detalla en el anterior subtítulo.

En la siguiente gráfica se representa el contenido de humedad (%) versus el porcentaje de aditivo:

Figura 49: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en los límites de consistencia del suelo A-4(8) del barrio Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento de las curvas que aparecen en la Figura 49, establecen una reducción en el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad a medida que aumenta el porcentaje de aditivo.

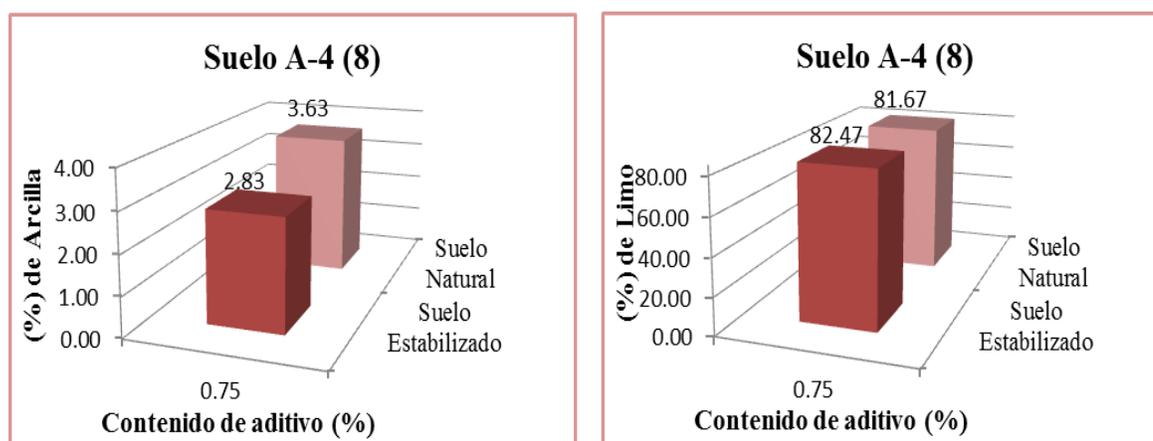
Como consecuencia de ambas alteraciones tanto del límite líquido y límite plástico, la reducción del índice de plasticidad del suelo es pequeña.

Con la adición del 0.75% de Sika Dust Seal, es decir el porcentaje recomendable para este tipo de suelo, se logra disminuir el índice de plasticidad de 4.41 en el material sin estabilizar, hasta alcanzar un valor de 3.89 en el material estabilizado.

4.5.1.5.Hidrómetro

Los análisis granulométricos por medio del hidrómetro fueron realizados solamente para el porcentaje recomendable de aditivo en cada suelo. El resumen de resultados se detalla en el anterior subtítulo y se presenta en la siguiente gráfica los resultados de los mismos para el suelo A-4(8).

Figura 50: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en el análisis granulométrico por medio del hidrómetro del suelo A-4(8) del barrio Lourdes



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar en la figura 50 una reducción en el porcentaje de arcilla al agregar el aditivo al suelo.

Se observa que en el suelo A-4(8) el porcentaje de arcilla se reduce de 3.63% en el material sin estabilizar, hasta alcanzar un valor de 2.83% con la adición de 0.75% de aditivo, mientras que el valor del porcentaje de limo aumenta de un 81.67% hasta alcanzar un valor de 82.47%

Esta reducción en el contenido de arcilla se ve reflejada en la disminución de la plasticidad del suelo.

4.5.2. Análisis de los ensayos de suelo A-6(10) – Sika Dust Seal (barrio Constructor)

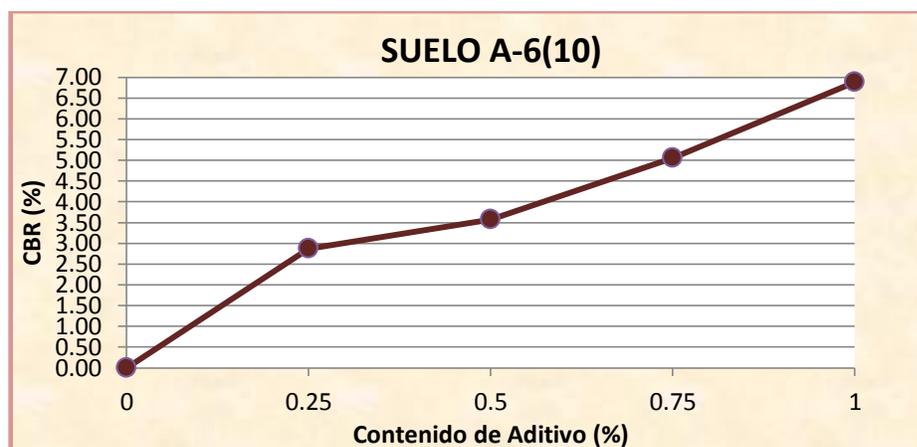
4.5.2.1. California Bearing Ratio

Cuadro 34: Valores de CBR del suelo A-6(10) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	CBR	
	100%	95%
0%	3.36	2.45
0.25%	3.97	2.87
0.50%	4.62	3.57
0.75%	6.75	5.06
1.00%	8.69	6.87

Fuente: Elaboración Propia

Figura 51: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en el CBR del suelo A-6(10) del barrio Constructor



Fuente: Elaboración Propia

La influencia del aditivo en los valores de CBR del suelo A-6(10) se aprecian en la Figura 51, en la cual se observa que a medida que aumenta el porcentaje de aditivo ocurre un incremento en el CBR del suelo tratado.

El suelo A-6(10) presenta un valor de capacidad soporte en estado natural de 2.45% de CBR, clasificando a este suelo como un material inadecuado para ser empleado en una capa subrasante, para que este material cumpla con las normas y características de

calidad para suelos tolerables para una subrasante, éste tiene que tener un CBR (%) > 3, lo cual se logra añadiendo al suelo un porcentaje de 0.50% de Sika Dust Seal, obteniendo con este porcentaje un CBR (%) de 3.57.

Tomando en cuenta los costos que representa añadir más estabilizante, es decir un mayor porcentaje de aditivo ya que valores mayores resultaría en una obra antieconómica lo cual no es el propósito de este trabajo y que al añadir 0.50% de aditivo se llega a cumplir con las normas y características de calidad para suelos tolerables para una capa subrasante, se establece que para la muestra de suelo A-6(10) el porcentaje recomendable es de 0.50% de Sika Dust Seal.

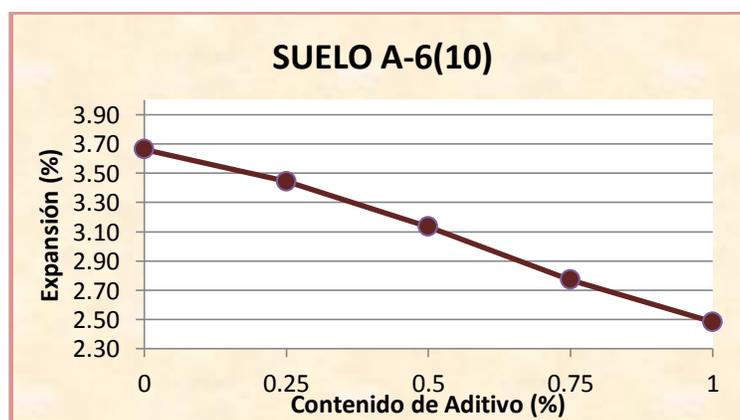
4.5.2.2. Expansión o hinchamiento

Cuadro 35: Expansión del suelo A-6(10) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Expansión (%)
0%	3.66
0.25%	3.44
0.50%	3.13
0.75%	2.77
1.00%	2.48

Fuente: Elaboración Propia

Figura 52: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la expansión del suelo A-6(10) del barrio Constructor



Fuente: Elaboración Propia

En el suelo A-6(10) observamos por el comportamiento de la curva que la expansión se reduce notablemente al incrementar el porcentaje de Sika Dust Seal, disminuyendo de 3.66% a 3.13% al añadir el 0.50% de Sika Dust Seal.

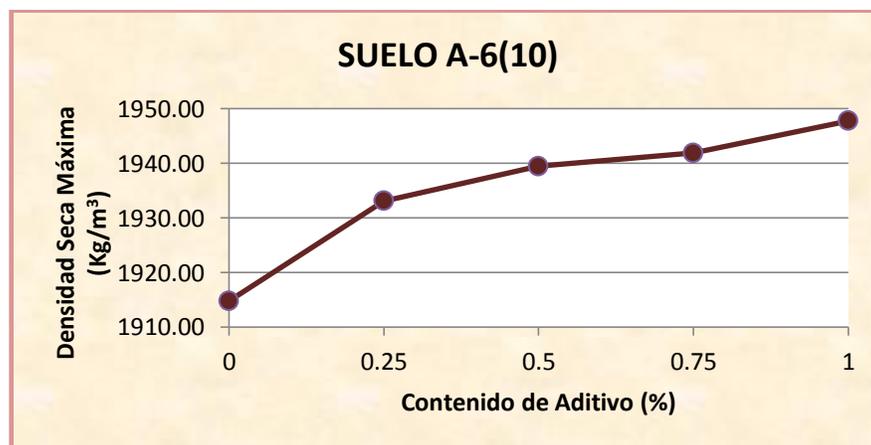
4.5.2.3. Compactación

Cuadro 36: Compactación del suelo A-6(10) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Proctor T-180	
	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)
0%	1914.76	12.28
0.25%	1933.12	11.89
0.50%	1939.49	11.28
0.75%	1941.92	10.82
1.00%	1947.80	10.53

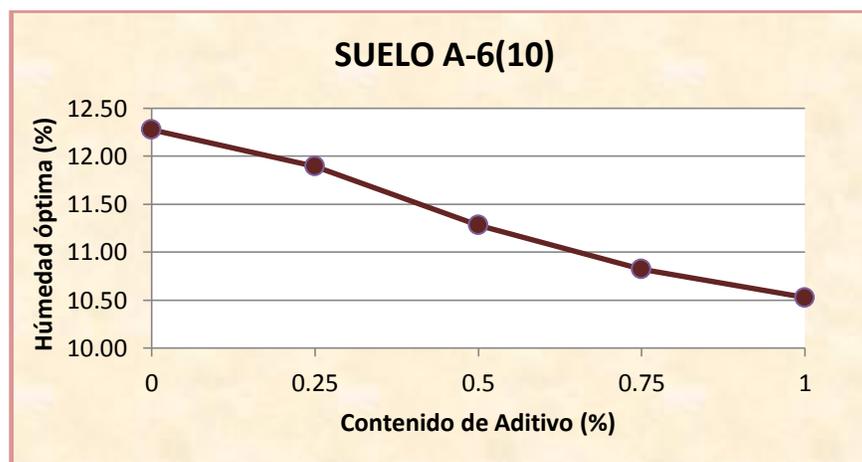
Fuente: Elaboración Propia

Figura 53: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la densidad máxima del suelo A-6(10) del barrio Constructor



Fuente: Elaboración Propia

Figura 54: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la humedad óptima del suelo A-6(10) del barrio Constructor



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar la variación que sufre la densidad máxima de compactación del suelo con la mezcla de aditivo.

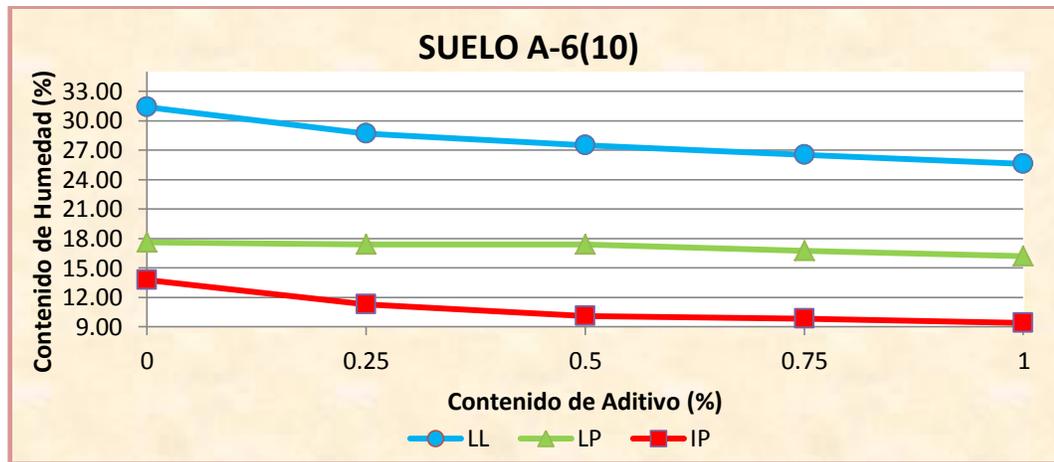
Se observa que en el suelo A-6(10) la densidad seca máxima aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.

Con la adición del porcentaje recomendable para este tipo de suelo, es decir, añadiendo 0.50% de Sika Dust Seal se logra aumentar la densidad seca máxima de 1914.76 kg/m^3 en el material sin estabilizar, hasta 1939.49 Kg/m^3 en el material estabilizado, este aumento del peso seco del suelo tratado con el aditivo es muy beneficioso ya que esto significara una mejor compactación.

Por otro lado, en la humedad óptima del suelo, al ser estabilizado se observa una tendencia a la reducción, teniendo un descenso de 12.28% en el material sin estabilizar, hasta 11.28% con la adición de 0.50% de aditivo, este efecto se debe al rechazo del agua que el aditivo provoca en los suelos tratados.

4.5.2.4.Límites de consistencia

Figura 55: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en los límites de consistencia del suelo A-6(10) del barrio Constructor



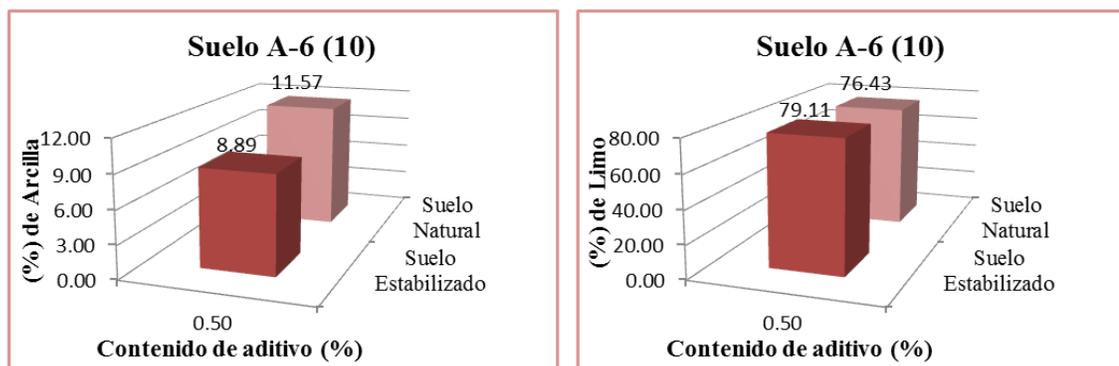
Fuente: Elaboración Propia

El comportamiento de las curvas en los límites del suelo A-6(10) se puede observar una reducción en el límite líquido e índice de plasticidad, y sin cambios significativos en el límite plástico, conforme se incrementa el porcentaje de aditivo.

Tomando en cuenta que el valor del índice de plasticidad presente en el suelo natural (sin tratar con aditivo) es de 13.77 se observa que al valor de 0.50% de aditivo el índice de plasticidad se reduce notablemente alcanzando el valor de 10.08, logrando con esta reducción obtener un suelo más estable.

4.5.2.5.Hidrómetro

Figura 56: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en el análisis granulométrico por medio del hidrómetro del suelo A-6(10) del barrio Constructor



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar en la figura 56 una reducción en el porcentaje de arcilla al agregar el aditivo al suelo.

Se observa que en el suelo A-6(10) el porcentaje de arcilla se reduce de 11.57% en el material sin estabilizar, hasta alcanzar un valor de 8.89% con la adición del porcentaje recomendable seleccionado, es decir 0.50% de Sika Dust Seal, mientras que el valor del porcentaje de limo aumenta de un 76.43% hasta alcanzar un valor de 79.11%.

Esta reducción en el contenido de arcilla se ve reflejada en la disminución de la plasticidad del suelo.

4.5.3. Análisis de los ensayos de suelo A-7-6(10) – Sika Dust Seal (barrio Paraíso)

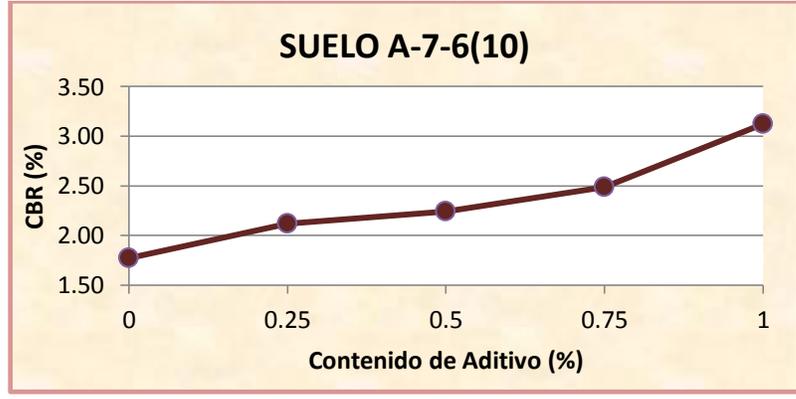
4.5.3.1. California Bearing Ratio

Cuadro 37: Valores de CBR del suelo A-7-6(10) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	CBR	
	100%	95%
0%	2.04	1.77
0.25%	2.33	2.12
0.50%	2.74	2.24
0.75%	3.17	2.49
1.00%	4.19	3.12

Fuente: Elaboración Propia

Figura 57: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en el CBR del suelo A-7-6(10) del barrio Paraíso



Fuente: Elaboración Propia

La influencia del aditivo en los valores de CBR del suelo A-7-6(10) se aprecian en la Figura 57, en la cual se observa que al igual que los otros dos tipos de suelos ocurre un incremento en el CBR del suelo tratado a medida que aumenta el porcentaje de aditivo.

El suelo A-7-6(10) presenta un valor de capacidad soporte en estado natural de 1.77% de CBR, clasificando a este suelo como un material sumamente inadecuado para ser empleado en una capa subrasante, para que este material cumpla con las normas y características de calidad para suelos tolerables para una subrasante, éste tiene que tener un CBR (%) > 3, lo cual se logra añadiendo al suelo un porcentaje de 1.00% de Sika Dust Seal, obteniendo con este porcentaje un CBR (%) de 3.12.

Tomando en cuenta los costos que representa añadir más estabilizante, es decir un mayor porcentaje de aditivo ya que valores mayores resultaría en una obra antieconómica lo cual no es el propósito de este trabajo y que al añadir 1.00% de aditivo se llega a cumplir con las normas y características de calidad para suelos tolerables para una capa subrasante, se establece que para la muestra de suelo A-7-6(10) el porcentaje recomendable es de 1.00% de Sika Dust Seal.

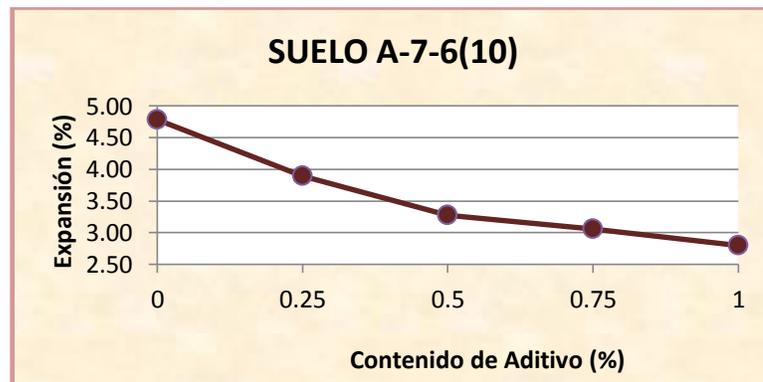
4.5.3.2. Expansión o hinchamiento

Cuadro 38: Expansión del suelo A-7-6(10) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Expansión (%)
0%	4.79
0.25%	3.90
0.50%	3.28
0.75%	3.06
1.00%	2.80

Fuente: Elaboración Propia

Figura 58: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la expansión del suelo A-7-6(10) del barrio Paraíso



Fuente: Elaboración Propia

En el suelo A-7-6(10) observamos por el comportamiento de la curva que la expansión se reduce notablemente al incrementar el porcentaje de Sika Dust Seal, disminuyendo de 4.79% a 2.80% al añadir al suelo tratado 1.00% de Sika Dust Seal.

El suelo A-7-6(10) es el suelo con mayor contenido de arcilla por lo que presentaba una expansión considerable que se controló por la inclusión del aditivo.

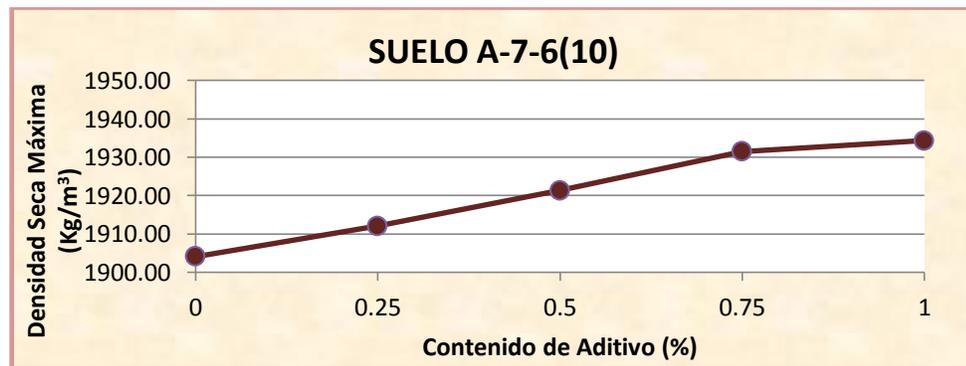
4.5.3.3. Compactación

Cuadro 39: Compactación del suelo A-7-6(10) a diferentes porcentajes de Sika Dust Seal

% de aditivo	Proctor T-180	
	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)
0%	1904.18	13.60
0.25%	1912.09	13.00
0.50%	1921.33	12.17
0.75%	1931.46	11.86
1.00%	1934.33	11.70

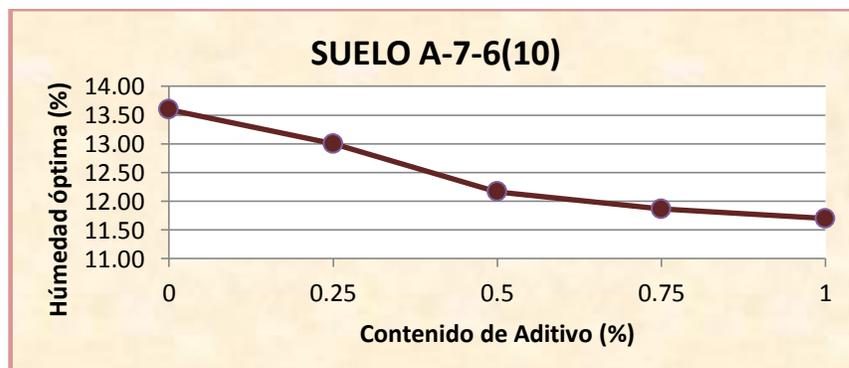
Fuente: Elaboración Propia

Figura 59: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la densidad máxima del suelo A-7-6(10) del barrio Paraíso



Fuente: Elaboración Propia

Figura 60: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en la humedad óptima del suelo A-7-6(10) del barrio Paraíso



Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar la variación que sufre la densidad máxima de compactación del suelo con la mezcla de aditivo.

Se observa que en el suelo A-7-6(10) al igual que los otros dos tipos de suelos que la densidad seca máxima aumenta y que la humedad óptima del suelo desciende a medida que se incrementa el porcentaje de aditivo.

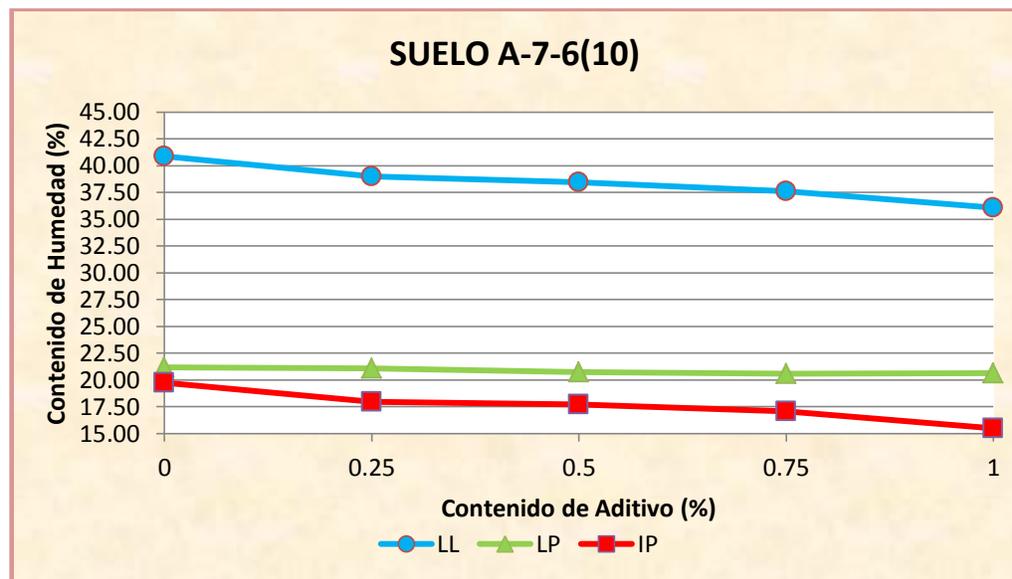
Con la adición del porcentaje recomendable para este tipo de suelo, es decir, añadiendo 1% de Sika Dust Seal se logra aumentar la densidad seca máxima de 1904.18 kg/m^3 en el material sin estabilizar, hasta 1934.33 Kg/m^3 en el material estabilizado.

Con el aumento de la densidad máxima en el suelo se obtendrá una mejor compactación.

Por otro lado, la humedad óptima del suelo reduce su valor de 13.60% en el material sin estabilizar, hasta 11.70% con la adición de 1.00% de aditivo, este efecto se debe al rechazo del agua que el aditivo provoca en los suelos tratados.

4.5.3.4.Límites de consistencia

Figura 61: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en los límites de consistencia del suelo A-7-6(10) del barrio Paraíso



Fuente: Elaboración Propia

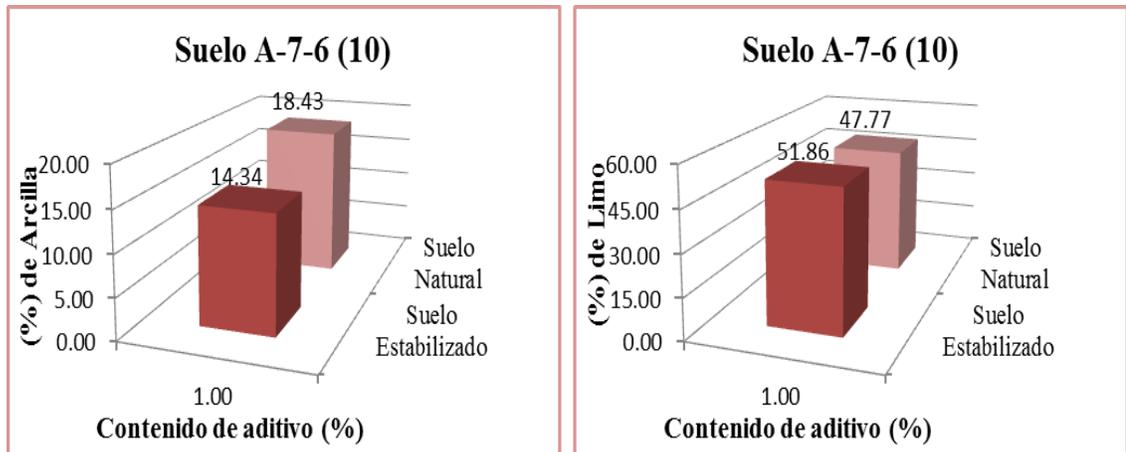
El comportamiento de las curvas en los límites del suelo A-7-6(10) se puede observar una reducción en el límite líquido e índice de plasticidad, y sin cambios significativos en el límite plástico, conforme se incrementa el porcentaje de aditivo.

Se puede apreciar que el índice de plasticidad del suelo no decrece de una manera significativa entre el 0.25% y 0.75% de aditivo, en donde se observa un gran descenso es al añadir el 1% de Sika Dust Seal, consiguiendo con la adición de este porcentaje de aditivo reducir el índice de plasticidad de 19.75 en el material sin estabilizar, hasta alcanzar un valor de 15.96, logrando con esta reducción obtener un suelo más estable.

4.5.3.5.Hidrómetro

Figura 62: Influencia del estabilizante Sika Dust Seal en el análisis granulométrico por medio del hidrómetro del suelo A-7-6(10) del barrio Paraíso

Fuente: Elaboración Propia



Se puede apreciar en la figura 62, al igual que los otros dos tipos de suelo, una reducción en el porcentaje de arcilla al agregar el porcentaje recomendable de aditivo al suelo.

Se observa que en el suelo A-7-6(10) el porcentaje de arcilla se reduce de 18.43% en el material sin estabilizar, hasta alcanzar un valor de 14.34% con la adición del porcentaje recomendable seleccionado, es decir 1.00% de Sika Dust Seal, mientras que el valor del porcentaje de limo aumenta de un 47.77% hasta alcanzar un valor de 51.86%.

Esta reducción en el contenido de arcilla se ve reflejada en la disminución de la plasticidad del suelo.

3.14 PORCENTAJE RECOMENDABLE DE SIKA DUST SEAL PARA CADA SUELO

Analizando las propiedades de los suelos presentamos la cantidad recomendable de Sika Dust Seal para cada suelo.

3.14.1 Porcentaje recomendable de Sika Dust Seal para la muestra de suelo A-4(8)

Cuadro 40: Cantidad recomendable de Sika Dust Seal para la muestra suelo A-4(8) perteneciente al Barrio Lourdes

% de aditivo	Límites			Proctor T-180		CBR		Expansión (%)
	L.I.	L.p.	I.P.	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)	100%	95%	
0%	23.93	19.52	4.41	1921.80	11.90	4.68	3.18	0.96
0.25%	22.58	18.35	4.23	1936.14	11.55	4.69	3.66	0.91
0.50%	20.96	16.97	3.99	1945.90	11.03	5.64	4.15	0.81
0.75%	20.13	16.25	3.89	1950.59	10.54	12.66	9.16	0.51
1.00%	19.27	15.67	3.59	1957.92	9.99	19.27	12.96	0.43

Fuente: Elaboración Propia

Como podemos observar en los resultados del suelo A-4(8) en la mezcla del suelo – Sika Dust Seal al 0.75% se obtuvo un CBR que cumple con las normas y características de calidad para suelos adecuados para una capa subrasante, CBR(%) > 5.

Los mejoramientos en el suelo tratado logrados con este porcentaje de aditivo se ven reflejados en las demás propiedades estudiadas, ya que el índice de plasticidad bajo de un 4.41 % a un 3.89%, la densidad máxima aumento de 1921.80 Kg/m³ a 1950.59 Kg/m³, la humedad óptima se redujo de un 11.90% a un 10.54%, y la expansión se redujo de 0.91% a un valor de 0.51%

3.14.2 Porcentaje recomendable de Sika Dust Seal para la muestra suelo A-6(10)

Cuadro 41: Cantidad recomendable de Sika Dust Seal para la muestra suelo A-6(10) perteneciente al Barrio Constructor

% de aditivo	Límites			Proctor T-180		CBR		Expansión (%)
	L.I.	L.p.	I.P.	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)	100%	95%	
0%	31.37	17.60	13.77	1914.76	12.28	3.36	2.45	3.66
0.25%	28.70	17.42	11.28	1933.12	11.89	3.97	2.87	3.44
0.50%	27.51	17.43	10.08	1939.49	11.28	4.62	3.57	3.13
0.75%	26.54	16.73	9.81	1941.92	10.82	6.75	5.06	2.77
1.00%	25.61	16.20	9.41	1947.80	10.53	8.69	6.87	2.48

Fuente: Elaboración Propia

Analizando la tabla de la muestra del suelo A-6(10) se puede establecer que la mezcla suelo-Sika Dust Seal al 0.50% es la más recomendable para estabilizar este tipo de suelo debido a que se obtiene un CBR de 3.57% siendo mayor al mínimo (3%) con lo que se logra cumplir con las normas y características de calidad para suelos tolerables para una capa subrasante. Los mejoramientos logrados con este porcentaje de aditivo se ven reflejados en las demás propiedades estudiadas ya que el índice de plasticidad bajo de un 13.77 % a un 10.08%, la densidad máxima aumento de 1914.76 Kg/m³ a 1939.49 Kg/m³, la humedad óptima se redujo de un 12.28% a un 11.28%, y la expansión se redujo de 3.66% a un valor de 3.13%

3.14.3 Porcentaje recomendable de Sika Dust Seal para la muestra suelo A-7-6(10)

Cuadro 42: Cantidad recomendable de Sika Dust Seal para la muestra suelo A-7-6(10) perteneciente al Barrio Paraíso

% de aditivo	Límites			Proctor T-180		CBR		Expansión (%)
	L.l.	L.p.	I.P.	D. máx. (Kg/m ³)	H. op.(%)	100%	95%	
0%	40.90	21.15	19.75	1904.18	13.60	2.04	1.77	4.79
0.25%	39.00	21.06	17.94	1912.09	13.00	2.33	2.12	3.90
0.50%	38.43	20.75	17.68	1921.33	12.17	2.74	2.24	3.28
0.75%	37.63	20.59	17.05	1931.46	11.86	3.17	2.49	3.06
1.00%	36.09	20.13	15.96	1934.33	11.70	4.19	3.12	2.80

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la tabla de la muestra del suelo A-7-6(10) se establece que la mezcla suelo-Sika Dust Seal al 1.00% es la más recomendable para estabilizar este tipo de suelo debido a que se obtiene un CBR de 3.12% siendo mayor al mínimo (3%) con lo que se logra cumplir con las normas y características de calidad para suelos tolerables para una capa subrasante. Los mejoramientos logrados con este porcentaje de aditivo se ven reflejados en las demás propiedades estudiadas ya que el índice de plasticidad bajo de 19.75 a 15.96, la densidad máxima aumento de 1904.18 Kg/m³ a 1934.33 Kg/m³, la humedad óptima se redujo de un 13.60% a un 11.70%, y la expansión se redujo de 4.79% a un valor de 2.80%.

3.15 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

4.7.1. Aplicación de la Distribución t de Student para la variable dependiente “CBR”

Muestra A-4(8) (CBR)

El porcentaje recomendable seleccionado para la muestra de suelo A-4(8) es de 0.75% de Sika Dust Seal ya que con este porcentaje se quiere alcanzar valores de CBR que cumplan las especificaciones técnicas para un suelo adecuado para una capa subrasante según el cuadro N°4: Categorías de suelos para terracería y capa subrasante, que se contempla en el capítulo II (ESTADO DE CONOCIMIENTO) de la presente investigación.

Datos:

Cuadro 43: Datos de CBR del suelo A-4(8) para ser sometidos al tratamiento estadístico

Suelo A-4(8)	
Nº	CBR (%)
1	9.59
2	8.95
3	9.35
4	9.80
5	10.09
6	8.76
7	9.69
8	9.07
9	9.38
10	10.17

Fuente: Elaboración Propia

Paso 1: Plantear hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (Hi)

Hipótesis alternativa (Hi):

Lo que se quiere comprobar

Los valores de CBR de la muestra de suelo A-4(8) obtenidos con el 0.75% de Sika Dust Seal cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo adecuado para una capa subrasante.

Valor de CBR (%) > 5

Hipótesis nula (H₀):

Lo contrario a la hipótesis alternativa

Los valores de CBR de la muestra de suelo A-4(8) obtenidos con el 0.75% de Sika Dust Seal no cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo adecuado para una capa subrasante

Valor de CBR (%) < 5

Paso 2: Determinar nivel de significancia

$\alpha = 0.001$

Paso 3: Evidencia muestral

$$\bar{X} = 9.473$$

$$S_x = 0.4692$$

Paso 4: Aplicando la Distribución de Probabilidad

Calculando t^*

Dónde:

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

\bar{X} = Media

μ = Valor a analizar

S_x = Desviación estandar

n = Tamaño de la muestra

$$t^* = \frac{9.473 - 5}{\frac{0.4692}{\sqrt{10}}} = 30.146$$

Grados de libertad (df)

$$df = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Paso 5: Toma de decisión

Se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

De la tabla “Puntos porcentuales de la distribución” (ANEXO VI) t se tiene:

Nivel de significancia = 0.001 y Grados de libertad = 9

Valor crítico de $t = 4.297$

Conclusión:

Como $t^* = 30.146 > t = 4.297$

Se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa

De acuerdo a la muestra, existe suficiente evidencia para demostrar que los valores de CBR de la muestra de suelo A-4 obtenidos con el de 0.75% de Sika Dust Seal cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo adecuado para una capa subrasante con un nivel de significancia de 0.001.

Muestra A-6(10) (CBR)

El porcentaje recomendable seleccionado para la muestra de suelo A-6(10) es de 0.50% de Sika Dust Seal ya que con este porcentaje se quiere alcanzar valores de CBR que cumplan las especificaciones técnicas para suelos tolerables para una capa subrasante según el cuadro N°4: Categorías de suelos para terracería y capa subrasante, que se contempla en el capítulo II (ESTADO DE CONOCIMIENTO) de la presente investigación.

Datos:

Cuadro 44: Datos de CBR del suelo A-6(10) para ser sometidos al tratamiento estadístico

Suelo A-6(10)	
Nº	CBR (%)
1	3.74
2	3.81
3	3.27
4	3.35
5	3.92
6	4.02
7	3.55
8	3.30
9	3.29
10	4.37

Fuente: Elaboración Propia

Paso 1: Plantear hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (Hi)

Hipótesis alternativa (Hi):

Lo que se quiere comprobar

Los valores de CBR de la muestra de suelo A-6(10) obtenidos con el 0.50% de Sika Dust Seal cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo tolerable para una capa subrasante.

Valor de CBR (%) > 3

Hipótesis nula (H₀):

Lo contrario a la hipótesis alternativa

Los valores de CBR de la muestra de suelo A-6(10) obtenidos con el 0.50% de Sika Dust Seal no cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo tolerable para una capa subrasante.

Valor de CBR (%) < 3

Paso 2: Determinar nivel de significancia

$\alpha = 0.001$

Paso 3: Evidencia muestral

$$\bar{X} = 3.645$$

$$S_x = 0.3737$$

Paso 4: Aplicando la Distribución de Probabilidad

Calculando t*

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{X} = Media

μ = Valor a analizar

S_x = Desviación estandar

n = Tamaño de la muestra

$$t^* = \frac{3.645 - 3}{\frac{0.3737}{\sqrt{10}}} = 5.458$$

Grados de libertad (df)

$$df = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Paso 5: Toma de decisión

Se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

De la tabla “Puntos porcentuales de la distribución” (ANEXO VI) se tiene:

Nivel de significancia = 0.001 y Grados de libertad = 9

Valor crítico de $t = 4.297$

Conclusión:

Como $t^* = 5.458 > t = 4.297$

Se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa

De acuerdo a la muestra, existe suficiente evidencia para demostrar que los valores de CBR de la muestra de suelo A-6(10) obtenidos con el de 0.50% de Sika Dust Seal cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo tolerable para una capa subrasante con un nivel de significancia de 0.001.

Muestra A-7-6(10) (CBR)

El porcentaje recomendable seleccionado para la muestra de suelo A-7-6(10) es de 1% de Sika Dust Seal ya que con este porcentaje se quiere alcanzar valores de CBR que cumplan las especificaciones técnicas para suelos tolerables para una capa subrasante según el cuadro N°4: Categorías de suelos para terracería y capa subrasante, que se contempla en el capítulo II (ESTADO DE CONOCIMIENTO) de la presente investigación.

Datos:

Cuadro 45: Datos de CBR del suelo A-7-6(10) para ser sometidos al tratamiento estadístico

Suelo A-7-6(10)	
Nº	CBR (%)
1	3.22
2	3.42
3	3.30
4	3.14
5	3.46
6	3.77
7	3.72
8	3.22
9	3.50
10	3.04

Fuente: Elaboración Propia

Paso 1: Plantear hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (Hi)

Hipótesis alternativa (Hi):

Lo que se quiere comprobar

Los valores de CBR de la muestra de suelo A-7-6(10) obtenidos con el 1% de Sika Dust Seal cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo tolerable para una capa subrasante.

Valor de CBR (%) > 3

Hipótesis nula (Ho):

Lo contrario a la hipótesis alternativa

Los valores de CBR de la muestra de suelo A-7-6(10) obtenidos con el 1.00% de Sika Dust Seal no cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo tolerable para una capa subrasante.

Valor de CBR (%) < 3

Paso 2: Determinar nivel de significancia

$\alpha = 0.001$

Paso 3: Evidencia muestral

$$\bar{X} = 3.371$$

$$S_x = 0.2406$$

Paso 4: Aplicando la Distribución de Probabilidad

Calculando t^*

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{X} = Media

μ = Valor a analizar

S_x = Desviación estandar

n = Tamaño de la muestra

$$t^* = \frac{3.371 - 3}{\frac{0.2406}{\sqrt{10}}} = 4.876$$

Grados de libertad (df)

$$df = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Paso 5: Toma de decisión

Se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

De la tabla “Puntos porcentuales de la distribución” (ANEXO VI) t se tiene:

Nivel de significancia = 0.001 y Grados de libertad = 9

Valor crítico de t = 4.297

Conclusión:

Como $t^* = 4.876 > t = 4.297$

Se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa

De acuerdo a la muestra, existe suficiente evidencia para demostrar que los valores de CBR de la muestra de suelo A-7-6(10) obtenidos con el de 1.00% de Sika Dust Seal cumplen con las especificaciones técnicas para un suelo tolerable para una capa subrasante con un nivel de significancia de 0.001

4.7.2. Aplicación de la Distribución t de Student para la variable dependiente “Índice de plasticidad”

Muestra A-4(8) (Índice de Plasticidad)

El índice de plasticidad de la muestra A-4(8) en estado natural es de 4.41 tomando en cuenta que a mayor índice de plasticidad de un suelo mayor inestabilidad presenta éste, se pretenderá reducir este valor al añadir a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.75%

Datos:

Cuadro 46: Datos de índice de plasticidad del suelo A-4(8) para ser sometidos al tratamiento estadístico

Suelo A-4(8)	
Nº	I.P.
1	3.78
2	3.47
3	3.98
4	3.18
5	3.00
6	3.64
7	4.32
8	2.85
9	3.88
10	4.26

Fuente: Elaboración Propia

Paso 1: Plantear hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (Hi)

Hipótesis alternativa (Hi):

Lo que se quiere comprobar

El índice de plasticidad de la muestra A-4(8) experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.75%.

Índice de plasticidad < 4.41

Hipótesis nula (Ho):

Lo contrario a la hipótesis alternativa

El índice de plasticidad de la muestra A-4(8) no experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.75%.

Índice de plasticidad = 4.41

Paso 2: Determinar nivel de significancia

$$\alpha = 0.001$$

Paso 3: Evidencia muestral

$$\bar{X} = 3.60$$

$$S_x = 0.5070$$

Paso 4: Aplicando la Distribución de Probabilidad

Calculando t^*

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{X} = Media

μ = Valor a analizar

S_x = Desviación estandar

n = Tamaño de la muestra

$$t^* = \frac{3.60 - 4.41}{\frac{0.5070}{\sqrt{10}}} = -5.052$$

Grados de libertad (df)

$$df = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Paso 5: Toma de decisión

Se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

De la tabla “Puntos porcentuales de la distribución” (ANEXO VI) t se tiene:

Nivel de significancia = 0.001 y grados de libertad = 9

Valor crítico de t = -4.297

Conclusión:

Como $t^* = -5.052 < t = -4.297$

Se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa

De acuerdo a la muestra, existe suficiente evidencia para demostrar que el índice de plasticidad de la muestra A-4(8) experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.75% con un nivel de significancia de 0.001

Muestra A-6(10) (Índice de plasticidad)

El índice de plasticidad de la muestra A-6(10) en estado natural es de 13.77 tomando en cuenta que a mayor índice de plasticidad de un suelo mayor inestabilidad presenta éste, se pretenderá reducir este valor al añadir a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.50%

Datos:

Cuadro 47: Datos de índice de plasticidad del suelo A-6(10) para ser sometidos al tratamiento estadístico

Suelo A-6(10)	
N°	I.P.
1	10.28
2	10.89
3	10.04
4	9.69
5	10.98
6	10.91
7	11.28
8	10.56
9	10.82
10	10.10

Fuente: Elaboración Propia

Paso 1: Plantear hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (Hi)

Hipótesis alternativa (Hi):

Lo que se quiere comprobar

El índice de plasticidad de la muestra A-6(10) experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.50%.

Índice de plasticidad < 13.77

Hipótesis nula (H₀):

Lo contrario a la hipótesis alternativa

El índice de plasticidad de la muestra A-6(10) no experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.50%.

Índice de plasticidad = 13.77

Paso 2: Determinar nivel de significancia

$$\alpha = 0.001$$

Paso 3: Evidencia muestral

$$\bar{X} = 10.54$$

$$S_x = 0.5067$$

Paso 4: Aplicando la Distribución de Probabilidad

Calculando t*

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{X} = Media

μ = Valor a analizar

S_x = Desviación estandar

n = Tamaño de la muestra

$$t^* = \frac{10.54 - 13.77}{\frac{0.5067}{\sqrt{10}}} = -20.158$$

Grados de libertad (df)

$$df = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Paso 5: Toma de decisión

Se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

De la tabla “Puntos porcentuales de la distribución” (ANEXO VI) t se tiene:

Nivel de significancia = 0.001 y grados de libertad = 9

Valor crítico de t = -4.297

Conclusión:

Como $t^* = -20.158 < t = -4.297$

Se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa

De acuerdo a la muestra, existe suficiente evidencia para demostrar que el índice de plasticidad de la muestra A-6(10) experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 0.50% con un nivel de significancia de 0.001

Muestra A-7-6(10) (Índice de plasticidad)

El índice de plasticidad de la muestra A-7-6(10) en estado natural es de 19.75 tomando en cuenta que a mayor índice de plasticidad de un suelo mayor inestabilidad presenta éste, se pretenderá reducir este valor al añadir a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 1%

Datos:

Cuadro 48: Datos de índice de plasticidad del suelo A-7-6(10) para ser sometidos al tratamiento estadístico

Suelo A-7-6(10)	
Nº	I.P.
1	15.45
2	15.98
3	17.51
4	17.43
5	16.62
6	16.44
7	16.73
8	16.04
9	14.79
10	14.93

Fuente: Elaboración Propia

Paso 1: Plantear hipótesis nula (Ho) e hipótesis alternativa (Hi)

Hipótesis alternativa (Hi):

Lo que se quiere comprobar

El índice de plasticidad de la muestra A-7-6(10) experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 1%.

Índice de plasticidad < 19.75

Hipótesis nula (Ho):

Lo contrario a la hipótesis alternativa

El índice de plasticidad de la muestra A-7-6(10) no experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 1.00%.

Índice de plasticidad = 19.75

Paso 2: Determinar nivel de significancia

$$\alpha = 0.001$$

Paso 3: Evidencia muestral

$$\bar{X} = 16.17$$

$$S_x = 0.9417$$

Paso 4: Aplicando la Distribución de Probabilidad

Calculando t^*

$$t^* = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Dónde:

\bar{X} = Media

μ = Valor a analizar

S_x = Desviación estandar

n = Tamaño de la muestra

$$t^* = \frac{16.17 - 19.75}{\frac{0.9417}{\sqrt{10}}} = -12.022$$

Grados de libertad (df)

$$df = n - 1 = 10 - 1 = 9$$

Paso 5: Toma de decisión

Se buscan las regiones de aceptación o rechazo.

De la tabla “Puntos porcentuales de la distribución” (ANEXO VI) se tiene:

Nivel de significancia = 0.001 y grados de libertad = 9

Valor crítico de $t = -4.297$

Conclusión:

Como $t^* = -12.022 < t = -4.297$

Se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa

De acuerdo a la muestra, existe suficiente evidencia para demostrar que el índice de plasticidad de la muestra A-7-6(10) experimenta un descenso significativo al agregar a dicha muestra el aditivo Sika Dust Seal en un porcentaje de 1.00% con un nivel de significancia de 0.001

3.16 CÁLCULO DE RENDIMIENTOS

3.16.1 Cálculo del rendimiento para 1 m³ de suelo A-4(8) estabilizado

Porcentaje recomendable: 0.75% de Sika Dust Seal

Densidad máxima del suelo natural A-4(8): 1921.80 Kg/m³

Densidad del aditivo Sika Dust Seal: 1.24 Kg/lit (ANEXO I)

5 Kg —————> 100%

x Kg —————> 0.75%

x = 0.0375 Kg.

$$1 \text{ lt} \longrightarrow 1.24 \text{ Kg}$$

$$x \text{ lt} \longrightarrow 0.0375 \text{ Kg}$$

$$x = 0.0302 \text{ lt. de Sika Dust Seal}$$

$$5 \text{ Kg} \longrightarrow 0.0302 \text{ lt}$$

$$1921.80 \text{ Kg.} \longrightarrow x \text{ lt}$$

$$x = \mathbf{11.608 \text{ lt. de Sika Dust Seal}}$$

Rendimiento para realizar la estabilización de 1 m^3 de suelo A-4(8): 11.608 lt. de Sika Dust Seal.

3.16.2 Cálculo del rendimiento para 1 m^3 de suelo A-6(10) estabilizado

Porcentaje recomendable: 0.50% de SIKA DUST SEAL

Densidad máxima del suelo natural A-6(10): 1914.76 Kg/m^3

Densidad del aditivo Sika Dust Seal: 1.24 Kg/lt (ANEXO I)

$$5 \text{ Kg} \longrightarrow 100\%$$

$$x \text{ Kg} \longrightarrow 0.50\%$$

$$x = 0.025 \text{ Kg.}$$

$$1 \text{ lt} \longrightarrow 1.24 \text{ Kg}$$

$$x \text{ lt} \longrightarrow 0.025 \text{ Kg}$$

$$x = 0.0202 \text{ lt. de Sika Dust Seal}$$

$$5 \text{ Kg} \longrightarrow 0.0202 \text{ lt}$$

$$1914.76 \text{ Kg.} \longrightarrow x \text{ lt}$$

$$x = 7.736 \text{ lt. de Sika Dust Seal para } 1 \text{ m}^3$$

Rendimiento para realizar la estabilización de 1 m^3 de suelo A-6(10): 7.736 lt. de Sika Dust Seal.

3.16.3 Cálculo del rendimiento para 1 m^3 de suelo A-7-6(10) estabilizado

Porcentaje recomendable: 1% de Sika Dust Seal

Densidad máxima del suelo natural A-7-6(10): 1904.18 Kg/m^3

Densidad del aditivo Sika Dust Seal: 1.24 Kg/lt (ANEXO I)

$$5 \text{ Kg} \longrightarrow 100\%$$

$$x \text{ Kg} \longrightarrow 1\%$$

$$x = 0.05 \text{ Kg.}$$

$$1 \text{ lt} \longrightarrow 1.24 \text{ Kg}$$

$$x \text{ lt} \longrightarrow 0.05 \text{ Kg}$$

$$x = 0.0403 \text{ lt. de Sika Dust Seal}$$

$$5 \text{ Kg} \longrightarrow 0.0403 \text{ lt}$$

$$1904.18 \text{ Kg.} \longrightarrow x \text{ lt}$$

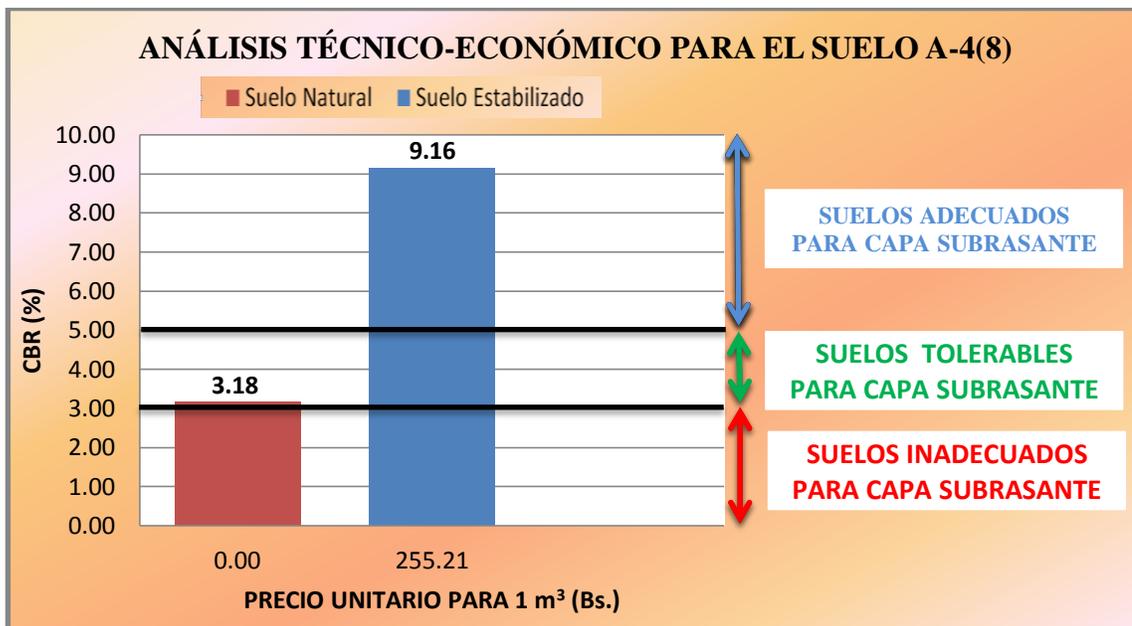
$$x = 15.348 \text{ lt. de Sika Dust Seal para } 1 \text{ m}^3$$

Rendimiento para realizar la estabilización de 1 m^3 de suelo A-7-6(10): 15.348 lt. de Sika Dust Seal.

3.17 ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO

3.17.1 Análisis técnico – económico para el suelo A-4(8)

Figura 63: Análisis técnico – económico para el suelo A-4(8)



Fuente: Elaboración Propia

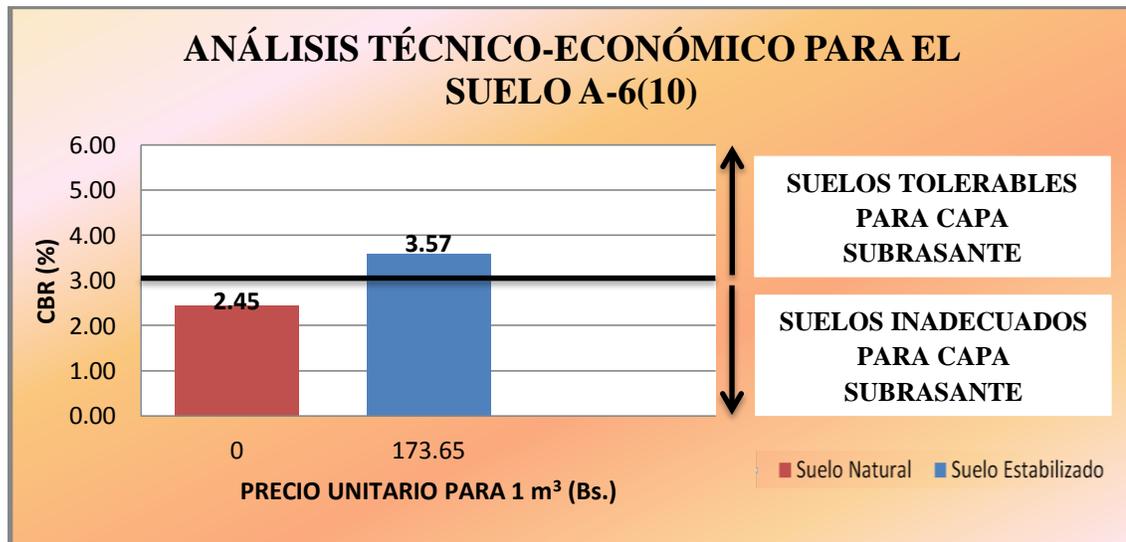
Con la finalidad de situar al suelo A-4(8) en una clasificación de tipos de subrasante más recomendable que en la que se encuentra en su estado natural, es decir establecer a este suelo en un rango de suelos adecuados para una capa subrasante, se añaden distintas cantidades de aditivo al suelo, llegando a obtener un porcentaje recomendable de 0.75% de Sika Dust Seal con el cual se consigue alcanzar dicha meta logrando el incremento de su CBR a un 9.16%.

El pago incluye todas las actividades de escarificación, aplicación del producto, homogeneización del material, corrección del perfil de la calzada, compactación, empleo de maquinaria y equipo, mano de obra y otros insumos necesarios, por lo tanto el costo por metro cúbico que tendrá realizar la aplicación del producto en campo para el suelo A-4(8) al porcentaje recomendable anteriormente mencionado será de 255.21Bs.

El detalle de las planillas de precios unitarios se muestra en el anexo VII (ANÁLISIS DE COSTOS).

3.17.2 Análisis técnico – económico para el suelo A-6(10)

Figura 64: Análisis técnico – económico para el suelo A-6(10)



Fuente: Elaboración Propia

El suelo A-6(10) presenta un valor de capacidad soporte en estado natural bastante bajo catalogando a este suelo como un material inadecuado para ser empleado en la capa subrasante.

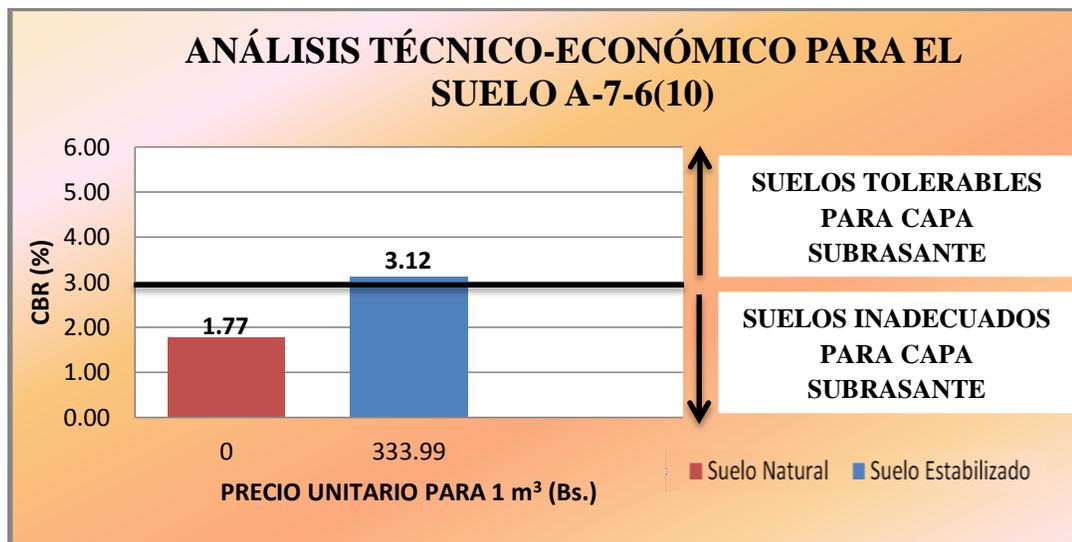
Con la finalidad de situar al suelo A-6(10) en una clasificación de suelos tolerables para capa subrasante, se añaden distintas cantidades de aditivo al suelo, llegando a obtener un porcentaje recomendable de 0.50% de Sika Dust Seal con el cual se consigue alcanzar dicha meta logrando el incremento del CBR del suelo tratado a un 3.57%

El pago incluye todas las actividades de escarificación, aplicación del producto, homogeneización del material, corrección del perfil de la calzada, compactación, empleo de maquinaria y equipo, mano de obra y otros insumos necesarios, por lo tanto el costo por metro cúbico que tendrá realizar la aplicación del producto en campo para el suelo A-6(10) al porcentaje recomendable anteriormente mencionado será de 173.65 Bs.

El detalle de las planillas de precios unitarios se muestra en el anexo VII (ANÁLISIS DE COSTOS).

3.17.3 Análisis técnico – económico para el suelo A-7-6(10)

Figura 65: Análisis técnico – económico para el suelo A-7-6(10)



Fuente: Elaboración Propia

El suelo A-7-6(10) presenta un valor de capacidad soporte en estado natural bastante bajo catalogando a este suelo como un material inadecuado para ser empleado en la capa subrasante.

Con la finalidad de situar al suelo A-7-6(10) en una clasificación de suelos tolerables para capa subrasante, se añaden distintas cantidades de aditivo al suelo, llegando a obtener un porcentaje recomendable de 1.00% de Sika Dust Seal con el cual se consigue alcanzar dicha meta logrando el incremento del CBR del suelo tratado a un 3.12%

El pago incluye todas las actividades de escarificación, aplicación del producto, homogeneización del material, corrección del perfil de la calzada, compactación, empleo de maquinaria y equipo, mano de obra y otros insumos necesarios, por lo tanto el costo por metro cúbico que tendrá realizar la aplicación del producto en campo para el suelo A-7-6(10) al porcentaje recomendable anteriormente mencionado será de 333.99 Bs.

El detalle de las planillas de precios unitarios se muestra en el anexo VII (ANÁLISIS DE COSTOS).

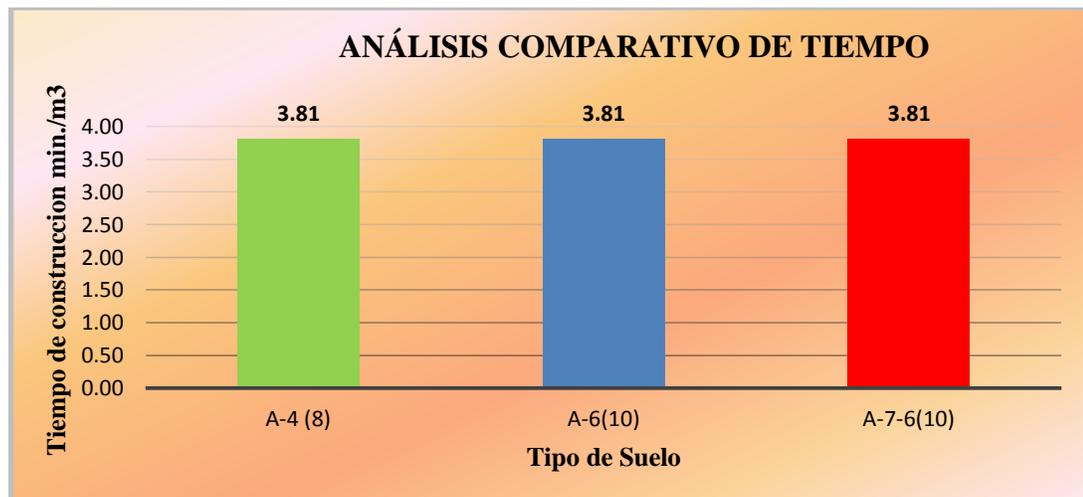
3.18 ANÁLISIS DE TIEMPO DE ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE PARA UN METRO CÚBICO

Cuadro 49: Tiempo de estabilización de subrasante para un metro cúbico

N°	Descripción Item	Unidad	Cantidad	Rendimiento		N° Cuadrilla	Tiempo Parcial		Duración P/Cronograma	TIEMPO EN MIN.
				Unitario	Parcial		Hrs/Dia Jornal	Sub Parcial		
1	Subrasante (Suelo A-4(8)) estabilizada con 0.75% de SIKA DUST SEAL	m ³	1.00	0.02116	0.0212	1.00	8.00	0.00265	1.00	3.81
2	Subrasante (Suelo A-6(10)) estabilizada con 0.50% de SIKA DUST SEAL	m ³	1.00	0.02116	0.0212	1.00	8.00	0.00265	1.00	3.81
3	Subrasante (Suelo A-7-6(10)) estabilizada con 1.00% de SIKA DUST SEAL	m ³	1.00	0.02116	0.0212	1.00	8.00	0.00265	1.00	3.81

Fuente: Elaboración Propia

Figura 66: Análisis comparativo de tiempo de estabilización en campo para un metro cúbico



Fuente: Elaboración Propia

Tomando en cuenta que el rendimiento del camión aguatero es el mayor con respecto a los demás equipos utilizados para llevar a cabo la aplicación del producto en campo se opta que dicho rendimiento será el representativo para estabilizar un metro cúbico de suelo, por lo tanto el tiempo que se requiere para realizar la aplicación del producto en campo en los tres tipos de suelos estudiados es de 3.81 minutos por metro cúbico.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados obtenidos en este estudio del suelo- Sika Dust Seal, los siguientes párrafos se constituyen en las conclusiones más importantes derivadas del presente trabajo de investigación.

- En la presente investigación se logró verificar mediante ensayos de laboratorio que al añadir el estabilizante Sika Dust Seal al suelo se superan las deficiencias presentes en este, de esta manera se acepta la hipótesis formulada.
- El suelo A-4(8) tiene un valor de CBR natural de 3.18% el cual al añadir 0.75% de Sika Dust Seal, se logró alcanzar una capacidad de soporte de 9.16% obteniendo una mejoría del 288% con respecto al CBR natural, con lo cual se cumple las especificaciones para un suelo adecuado para una capa subrasante.
- El suelo A-6(10) presenta un valor de capacidad soporte en estado natural bastante bajo (2.45% de CBR) lo que cataloga a este suelo como un material pésimo para ser empleado en la subrasante, sin embargo, los resultados obtenidos demuestran que la adición de Sika Dust Seal puede influir de manera sustancial en los valores del CBR, siendo el porcentaje recomendable para estabilizar dicha muestra el de 0.50% de Sika Dust Seal, logrando alcanzar con este porcentaje un valor de 3.57% de CBR con lo cual se cumple las especificaciones para un suelo tolerable para una capa subrasante, obteniendo de esta manera una mejoría del 146%.
- El suelo A-7-6(10) presenta un valor de capacidad soporte en estado natural bastante bajo (1.77% de CBR) lo que cataloga a este suelo como un material pésimo para ser empleado en la subrasante, sin embargo, los resultados obtenidos demuestran que la adición de Sika Dust Seal puede influir de manera sustancial en los valores del CBR, siendo el porcentaje recomendable para estabilizar dicha muestra el de 1.00% de Sika Dust Seal, logrando alcanzar con este porcentaje un valor de 3.12% de CBR con lo cual se cumple las

especificaciones para un suelo tolerable para una capa subrasante, obteniendo de esta manera una mejoría del 176%.

- En el caso del suelo A-4(8) su expansión inicial era pequeña (0.96% de expansión) pero aun así se redujo aún más con la mezcla del aditivo hasta obtener un valor de (0.51% de expansión), logrando de esta manera un descenso del 188% con respecto al suelo natural.
- En la muestra de suelo A-6(10) su expansión experimento un descenso significativo de 117% con respecto al suelo natural, habiéndose demostrado mediante ensayos de laboratorio que este valor disminuye de (3.66% de expansión) en estado natural a (3.13% de expansión) con el 0.50% de Sika Dust Seal.
- En la muestra de suelo A-7-6(10), su expansión experimento un descenso significativo de 171% con respecto al suelo natural, habiéndose demostrado mediante ensayos de laboratorio que este valor disminuye de (4.79% de expansión) en estado natural a (2.80% de expansión) con el 1.00% de Sika Dust Seal.
- También se notó el efecto del aditivo en la compactación de los tres suelos estudiados, se verifico que la densidad seca máxima aumenta considerablemente con el incremento de la cantidad de Sika Dust Seal y lo contrario ocurre con la humedad óptima, ya que este parámetro disminuye con el aumento de la cantidad de Sika Dust Seal, este efecto se debe al rechazo del agua que el aditivo provoca en los suelos tratados.
- En la muestra de suelo A-4(8) se observó una reducción en el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad a medida que aumentaba el porcentaje de aditivo. El índice de plasticidad experimentó un descenso de 4.41 en estado natural a 3.89 con el 0.75% de Sika Dust Seal.
- En la muestra de suelo A-6(10), el límite plástico no cambio mucho y debido a la disminución del límite liquido fue que el índice de plasticidad de este suelo experimento un descenso significativo de 13.77 en estado natural a 10.08 con el 0.50% de Sika Dust Seal.
- En la muestra de suelo A-7-6(10), el límite plástico no cambio mucho y debido a

la disminución del límite líquido fue que el índice de plasticidad de este suelo experimento un descenso significativo de 19.75 en estado natural a 15.96 con el 1% de Sika Dust Seal.

- Los límites de consistencia del A-4(8), sitúan al mismo en la carta de plasticidad arriba de la línea A y a la izquierda de la línea B, por consiguiente, estas características en un comienzo clasifican al suelo natural como suelos limosos inorgánicos de baja comprensibilidad con presencia de arcillas inorgánicas (CL-ML) pero luego, conforme se incrementa el contenido de Sika Dust Seal, el suelo tiende a desplazarse hacia la izquierda y hacia abajo en la carta de plasticidad, hasta enmarcarse finalmente en el área del grupo de suelos ML, demostrando de esta manera la rápida evolución que sufre el suelo con la adición de Sika Dust Seal.
- Al incrementar el contenido de Sika Dust Seal en el suelo A-6(10), el límite líquido e índice de plasticidad disminuyen, hasta enmarcarse finalmente en el área del grupo de suelos A-4(8), demostrando de esta manera la rápida evolución que sufre el suelo con la adición de Sika Dust Seal.
- Al incrementar el contenido de Sika Dust Seal en el suelo A-7-6(10) el límite líquido e índice de plasticidad disminuyen, hasta enmarcarse finalmente en el área del grupo de suelos A-6(8), demostrando de esta manera la rápida evolución que sufre el suelo con la adición de Sika Dust Seal.
- En lo que respecta al tema económico, el costo para un metro cúbico estabilizado empleando equipo y maquinaria adecuada para el suelo A-4(8) es de 255.21 Bs. Garantizando con esta estabilización cumplir las especificaciones para un suelo adecuado para una capa subrasante.
- El costo para un metro cúbico estabilizado para el suelo A-6(10) es de 173.65 Bs. Garantizando con esta estabilización cumplir las especificaciones para un suelo tolerable para una capa subrasante.
- El costo para un metro cúbico estabilizado para el suelo A-7-6(10) es de 333.99 Bs. Garantizando con esta estabilización cumplir las especificaciones para un suelo tolerable para una capa subrasante.
- El tiempo que se requerirá para realizar la aplicación del producto en campo en

los tres tipos de suelos estudiados es de 3.81 minutos por metro cúbico.

- Las vías estabilizadas con Sika Dust Seal se verán beneficiadas debido a que la aplicación de este producto tiene como característica aglomerar las partículas eliminando las nubes de polvo, mejorando las condiciones de seguridad de conducción y disminuyendo las emisiones de material particulado el cual es potencialmente nocivo a las personas y la comunidad por la reducción de polvo.

5.1. RECOMENDACIONES

- Para las pruebas de laboratorio se aconseja seguir los pasos mencionados, esto con el objeto de obtener mejores resultados.
- Se debe realizar necesariamente un análisis en el laboratorio previo a la estabilización en campo, pues como se vio las cantidades óptimas de producto varían dependiendo del tipo de suelo a tratar.
- El presente trabajo de investigación pretende convertirse en un lineamiento referencial para trabajos futuros al respecto, ya que es de suma importancia tener pleno conocimiento de las características particulares del suelo y del material estabilizante Sika Dust Seal.