

CAPÍTULO I

1 DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

Se tiene como referencia que se realizaron trabajos de investigación para verificar la efectividad de Rocamix, en la Habana (Cuba) en el instituto superior politécnico “JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA”

En Bolivia no se tiene registro alguno del uso del sistema Rocamix, que es producto relativamente nuevo en el mercado, en los países que tiene presencia este aditivo para la estabilización de suelos es Chile, Colombia, Perú, Cuba. La empresa Rocamix tiene como visión poder ser una nueva alternativa de estabilización, con el propósito de competir frente a los otros aditivos ofreciendo múltiples beneficios.

En Tarija no se tiene conocimiento ni registro sobre el uso de este estabilizante, por lo cual en la presente investigación se analizará la aplicación de Rocamix más cemento portland para la estabilización de suelos arcillosos con el objeto de determinar la cantidad optima de Rocamix y cemento que cumplan con las especificaciones para subrasantes según la normativa de la administradora boliviana de carreteras (ABC).

Este trabajo será aplicado tomando diferentes muestras de sectores en algunos barrios de la ciudad de Tarija, como referencia, pero su aplicación será realizada al barrio Torrecillas.

La presente investigación servirá como aporte de referencia para la aplicación de este producto (Rocamix), en cantidades óptimas para suelos arcillosos definido en la investigación, para ser utilizado por profesionales del medio y estudiantes en general.

DISEÑO TEÓRICO

1.2 DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

1.2.1 Determinación de la línea de estudio Argumentos

Dentro de la estabilización de suelos, el material, elemento y/o sustancia juega un papel importante dentro de todo el proceso que significa mejorar las condiciones de los suelos. Estas características tienen que ser permanentes en el tiempo y espacio para asegurar la vida útil proyectada en una obra de ingeniería. Con el tiempo las solicitaciones de cargas en estructuras, cimentaciones han sufrido un incremento por lo que se requiere que los suelos cuenten con condiciones mínimas de resistencia según especificaciones. En algunas ocasiones en las cercanías de las obras no se dispone de materiales adecuados en función a las especificaciones, por lo cual se recurre a una técnica tradicional de la estabilización de suelos.

La Estabilización en suelos se basa en un proceso de mejorar las características de un suelo desde el punto vista de ingeniería ya que en su estado natural no reúne las condiciones para ser utilizado como material de subrasante.

La estabilización con el nuevo sistema Rocamix líquido, busca a través de su aplicación dotarle de una estabilidad al suelo en el tiempo de vida útil de la construcción. Para asegurarse de una correcta estabilización se debe realizar trabajos previos a la aplicación del aditivo a través de ensayos de laboratorio que nos evalúen las propiedades de los suelos en su estado natural. Con el firme propósito de verificar la efectividad del aditivo llevando los resultados a una comparación con las muestras sin estabilizar, a través de distintas dosificaciones de Rocamix más cemento, orientadas a buscar la combinación más eficiente de manera tal que los suelos deberán cumplir ciertos parámetros de resistencia mínimos como para ser firme estable de una subrasante, obteniéndose así resultados óptimos que verifiquen la compatibilidad del aditivo con el suelo, alcanzando niveles altos de capacidad de soporte en los mismos, además de ofrecerle al ingeniero una alternativa nueva para estabilizar suelos arcillosos.

1.2.2 Breve descripción de causales identificados

Para identificar las causales se siguió la siguiente técnica en función de responder las preguntas realizadas primeramente sobre el tema elegido, como ser:

- ¿Qué es una estabilización de suelos arcillosos?
- ¿Qué compone la estabilización de suelos arcillosos?
- ¿para qué sirve la estabilización de suelos arcillosos?
- ¿Cumple siempre el para qué sirve una estabilización de suelos arcillosos?
- ¿Qué elementos afectan a una estabilización de suelos arcillosos?

Donde se debe observar cada componente y pensar en alguna deficiencia que este pudiera tener, formular y escribir afirmaciones negativas de cada una de las ideas que se imagina, mostradas a continuación:

Causales ubicadas en respuestas a preguntas definidas

- Existe una incorrecta evaluación de las propiedades de plasticidad, compactación, CBR de los suelos en su estado natural.
- No existen controles rigurosos de calidad en la aplicación del aditivo en un proceso de estabilización de suelos.
- No existe una compatibilidad entre el aditivo (estabilizante) y los suelos a estabilizar.
- Que no se aplique de manera eficiente la teoría del mejoramiento de suelos, referido a una estabilización de los mismos.
- Que el proceso de aplicación en la estabilización de suelos, no se esté llevando a cabo de manera correcta.

Identificación del objeto de estudio.

A continuación se siguieron los siguientes pasos concretos para la identificación del objeto de estudio:

Configuración de las causales utilizando el NO

- No existe una correcta evaluación de las propiedades de plasticidad, compactación, CBR de los suelos en su estado natural.
- No existen controles rigurosos de calidad en la aplicación del aditivo en un proceso de estabilización de suelos.
- No existe una compatibilidad entre el aditivo (estabilizante) y los suelos a estabilizar.
- No se aplique de manera eficiente la teoría del mejoramiento de suelos, referido a una estabilización de los mismos.
- No se esté llevando a cabo de manera correcta, el proceso de aplicación en la estabilización de suelos.
 - *Selección de causales*
 - *Causales seleccionados*
- No existe una correcta evaluación de las propiedades de plasticidad, compactación, CBR de los suelos en su estado natural.
- No existen controles rigurosos de calidad en la aplicación del aditivo en un proceso de estabilización de suelos.
- No se aplique de manera eficiente la teoría del mejoramiento de suelos, referido a una estabilización de los mismos.
- **Configuración de cambio del NO por el SI**
- Si existe una correcta evaluación de las propiedades de plasticidad, compactación, CBR de los suelos en su estado natural.
- Si existen controles rigurosos de calidad en la aplicación del aditivo en un proceso de estabilización de suelos.
- Si se aplica de manera eficiente la teoría del mejoramiento de suelos, referido a una estabilización de los mismos.

Aplicando la conexión de la simple implicación. “Si p entonces q”

p	1	1	2	2	3	3
Q	2	3	1	3	1	2
Sentido	V	V	F	V	F	V

La proposición que tiene más verdadero se selecciona como el objeto de estudio.

1.2.3 Identificación del objeto de estudio.

- “Estabilización de suelos”

1.2.4 Determinación de la perspectiva de solución

La perspectiva marca la línea que se pretende seguir en la investigación, donde nos enfocamos en una acción de lo que pretendemos realizar, teniendo como referencia a la idea, a cual le proporcionaremos una perspectiva.

- Idea

“Estabilización en suelos arcillosos”

Perspectiva:

Optimizar

- La estabilización en suelos arcillosos con nuevos materiales estabilizantes o una combinación entre dos sustancias, que permitan aumentar la resistencia de suelos, que pudiera mantener estable esta propiedad en el tiempo.
- el costo que involucra un mejoramiento de suelos, a través de materiales que se encuentren disponible en el mercado, que no estén en riesgo de disminuir su disponibilidad en el medio, en comparación de materiales costosos que se usaban anteriormente como estabilizante.
- El tiempo de ejecución de un proceso que con lleva un mejoramiento de suelos en el sitio de la obra.

1.3 SITUACIÓN PROBLÉMICA

Muchas investigaciones han demostrado que la estabilización es una de las técnicas más eficientes para mejorar la capacidad portante de los suelo, pues en numerosas ocasiones en las cercanías de la obra no existen prestamos de materiales con la calidad adecuada para ser utilizados.

En los últimos años en Bolivia se realizó estudios sobre la utilización de aditivos para la estabilización de suelos, por la efectividad para mejorar sus condiciones de estos, actualmente en el país no se realizó estudios con el aditivo Rocamix, por lo cual no se cuenta con las cantidades óptimas de Rocamix y cemento para su aplicación, teniendo solo de referencia el manual de aplicación con el que cuenta la empresa.

En Tarija el uso de aditivos se ha visto afectada al no tener disponible en el mercado y no contar con una fábrica que elabore los aditivos, por lo que los precios aumentan al tener que ser importados de otros países, de forma que a partir de lo anterior surge la necesidad de desarrollar esta investigación, donde se pretenden optimizar el material estabilizante para mejorar las condiciones del suelo, variando su contenido de Rocamix líquido más una cantidad de cemento, representados en porcentajes respecto al peso. Para ello se emplearán los ensayos de laboratorio de suelos descritos por el manual de ensayos de la ABC (administradora Boliviana de Carreteras), cuyos ensayos nos permitan determinar la efectividad del producto, y evaluar las mejoras que adquirieron los suelos.

1.4 DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo puedo estabilizar un suelo arcilloso, mediante la aplicación óptima de la cantidad de Rocamix y cemento portland de manera que el suelo cumpla con las especificaciones para subrasante según la administradora boliviana de carreteras?

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Analizar la aplicación de Rocamix y cemento portland, para determinar la cantidad optima en la estabilización de suelos arcillosos, de forma que cumplan con las especificaciones en subrasantes según la normativa de la ABC.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Recopilación y análisis de la información sobre estabilización de suelos de manera tradicional y la aplicación en la estabilización de Rocamix según su manual de utilización.
- Obtención de muestras de material de diferentes sectores en algunos barrios de la ciudad de Tarija como referencia y su aplicación en el barrio torrecillas.
- Realización de ensayos de laboratorio de granulometría, plasticidad, compactación y CBR y absorción capilar del suelo en estado natural y caracterización en función de la tabla de aplicación de Rocamix según su manual.
- Aplicación de Rocamix en distintas dosificaciones para obtener el porcentaje mínimo adecuado en suelos arcillosos.
- Realización de ecuaciones y graficas del comportamiento de suelos arcillosos y Rocamix para su análisis estadístico.
- Comparación de resultados de suelos estabilizados de manera tradicional (cal y cemento), y suelos estabilizados con Rocamix.
- Proponer las cantidades óptimas de aplicación de Rocamix más cemento portland para suelos arcillosos.

1.6 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.6.1 Hipótesis

¿La aplicación de Rocamix y cemento portland en cantidades óptimas permitirá estabilizar suelos arcillosos que mejoren sus propiedades físico-mecánicas (plasticidad, densidad y CBR), para que cumplan con las especificaciones para subrasantes según la normativa de la ABC?

1.6.2 Identificación de variables

Variable independiente (X)

- Estabilización de suelos con Rocamix y cemento

Variable dependiente (Y)

- Suelo Arcillosos

1.6.3 Conceptualización y operacionalidad de variables

Rocamix: Es una solución acuosa de compuestos de amonio cuaternario. Composición de monómeros y polímeros de origen orgánico
Formula química: Una mezcla poli molecular sustancias activas interfaciales disolventes, emulador y catálisis CAS 112-03-08 con un contenido determinado de acetato de celulosa CAS 9004-35-7 e hidratos de carbono complejo compuesto de largas cadenas de unidades de glucosa, unidas por enlaces químicos de glicósido y componentes exclusivos Rocamix.

Es un producto semi viscoso formado por la mezcla de monómeros y polímeros con catalizadores, e intercambiadores iónicos y aceleradores de penetración.

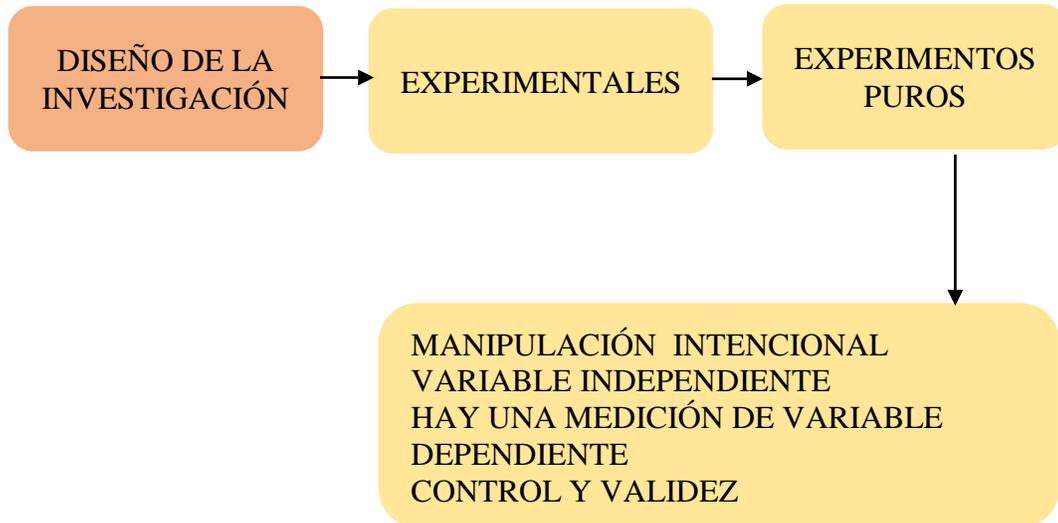
TABLA 1.1 Operacionalización de las variables

Variable independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Rocamix cemento portland	Se refiere a las combinaciones de distintas proporciones de aditivo Rocamix más Cemento Portland más Suelo Arcilloso, que se medirán de acuerdo con el tipo de suelo y que se irán incrementado las distintas cantidades de aditivo	Rocamix liquido cemento portland	Cantidad de litros por metro cubico de tierra. Cantidad de kg por metro cubico de tierra	Cantidad determinada de acuerdo con el laboratorio
Variable dependiente Suelo arcilloso		CBR	Muestra compactada	100% laboratorio

DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.7 IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Figura 1.1 Tipo de diseño de investigación



1.8 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL POR VARIABLE

1.8.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio: suelos arcillosos

1.8.2 Población

Suelos arcillosos de algunos barrios de la ciudad de Tarija

1.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

TABLA 1.2 Valores de nivel de confianza

nivel de confianza %	valor del nivel de confianza Z
50	0.574
80	1.280
85	1.444
90	1.640
95	1.960
99	2.680

El nivel de confianza para esta investigación será del 85% con un valor de $z = 1.444$

1.9.1 Tamaño y muestra:

- Para el infinito desconocido

N	Por proporciones	Varianzas
Infinito [desconocido]	$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2}$	$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2}$
Finito [conocido]	$n = \frac{N * z^2 * p * q}{(N - 1) * e^2 * p * q}$	$n = \frac{N * z^2 * \sigma^2}{(N - 1) * e^2 + z^2 * \sigma^2}$

Cálculo del tamaño de mi muestra será obtenido por proporciones:

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{e^2}$$

$$Z = 1.444 \text{ N.C} = 85\% \text{ P}=0.60; \text{q}=0.40; \text{e}= 0.15$$

Por lo tanto

$$n= 22 \text{ tamaños de mi muestra}$$

1.9.2 Selección de las técnicas de muestreo

La técnica que se usará será la técnica de: Muestra aleatoria simple

1.9.3 Justificación de factibilidad recursos insumos y medios utilizados

El presente trabajo consiste en la estabilización de suelos arcillosos con la aplicación de Rocamix líquido más cemento portland, por lo cual se podrá desarrollar por la factibilidad de todos sus elementos que componen la investigación, ya que se cuenta con los equipos requeridos para realizar los ensayos en laboratorio en la U.A.J.M.S, además de disponer del manual de aplicación de la empresa Rocamix sobre los equipos y maquinarias que se utilizan para aplicar este tipo de estabilización para su aplicación en obra.

Se cuenta con el apoyo de profesionales en línea de la empresa Rocamix que dotara el aditivo, para la realización de la presente investigación, sobre las dosificaciones para obtener los resultados esperados, el cemento portland que es otro componente de la estabilización y que es accesible en nuestro medio, que será utilizado en una cantidad según las especificaciones de la empresa Rocamix, la que indica que son mínimas por lo que el costo será razonable.

Medios

Para la realización de la investigación se utilizarán los siguientes equipos y materiales.

Figura 1.2 Herramientas para la extracción de muestras



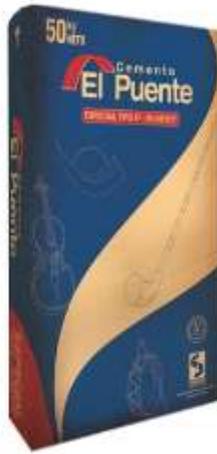
Fuente: Elaboración propia

Figura 1.3 Rocamix



Fuente: Elaboración propia

Figura 1.4 Cemento portland



Fuente: <https://www.google.com/search?q=imagen+de+cemento++el+puente>

Figura 1.5 Equipos de laboratorio

Tamices y equipo casa grande



Fuente: Elaboración propia

Molde de compactación



Fuente: Elaboración propia
Prensa y molde de CBR



Fuente: Elaboración propia

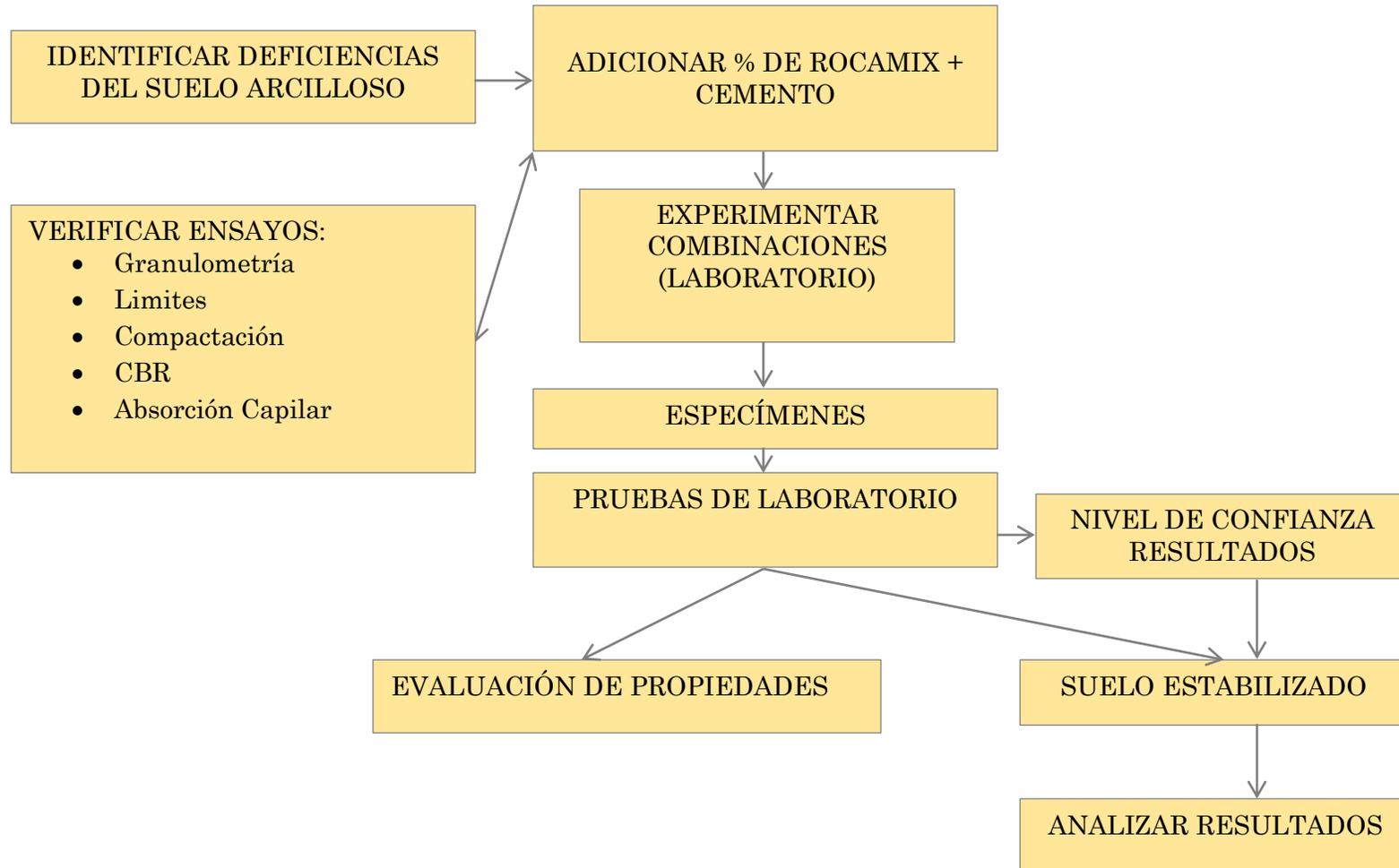
1.10 MÉTODO Y PROCEDIMIENTO LÓGICOS

1.10.1 Listado de actividades a realizar

- Realizar una recopilación de información sobre estabilizaciones de suelos de manera tradicional.
- Instrumentos y técnicas (planillas de registro).
- Identificación del barrio de aplicación y otros barrios.
- Obtener muestras de materiales de diferentes sectores en algunos barrios de la ciudad de Tarija.
- Realizar ensayos para la caracterización de las muestras en estado natural en el laboratorio de la universidad.
 - Granulometría.
 - Límites.
 - Compactación.
 - CBR.
 - Absorción capilar.
- Caracterización de suelos en función de la tabla de aplicación de Rocamix, según su manual.
- Aplicación de Rocamix y cemento portland en distintas dosificaciones para obtener el porcentaje óptimo adecuado en suelos arcillosos.
- Experimentar combinaciones en el laboratorio.
- Realizar especímenes.
- Realización de ecuaciones y gráficas del comportamiento de suelos arcillosos y Rocamix para su análisis estadístico.
- Comparación de resultados de suelos estabilizados de manera tradicional (cal y cemento), y suelos estabilizados con Rocamix.
- Proponer las cantidades óptimas de aplicación de Rocamix más cemento portland para suelos arcillosos.

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

PERSPECTIVA: optimizar



1.10.3 Producto esperado

Los productos esperados en correspondencia con el procedimiento de la perspectiva en esta investigación es realizar distintas dosificaciones de Rocamix más cemento portland, y aplicarlas a las muestras de suelos, con el propósito de obtener distintos niveles en el valor de CBR (relación soporte de california), constatar además la influencia del aditivo en la plasticidad del suelo natural, se tiene también propuesto elaborar distintos especímenes con distintas proporciones de los dos aditivos con el energía de proctor modificado, con la humedad optima determinada inicialmente, para el ensayo de absorción capilar que nos refleja como una muestra de suelo puede absorber agua en tiempo dado, verificando de esta manera el comportamiento de las muestras, cuando son estabilizadas.

Obteniéndose así distintos resultados que permitan evaluar, analizar y elegir una dosificación óptima que le brinde a los suelos características mínimas de resistencia para que puedan ser utilizables en una construcción de subrasante donde antes no eran considerados utilizables.

1.10.4 Resultados esperados

Obtener valores de CBR mayores a los que inicialmente se tenía en los suelos, y puedan convertirse en una alternativa de uso para el ingeniero.

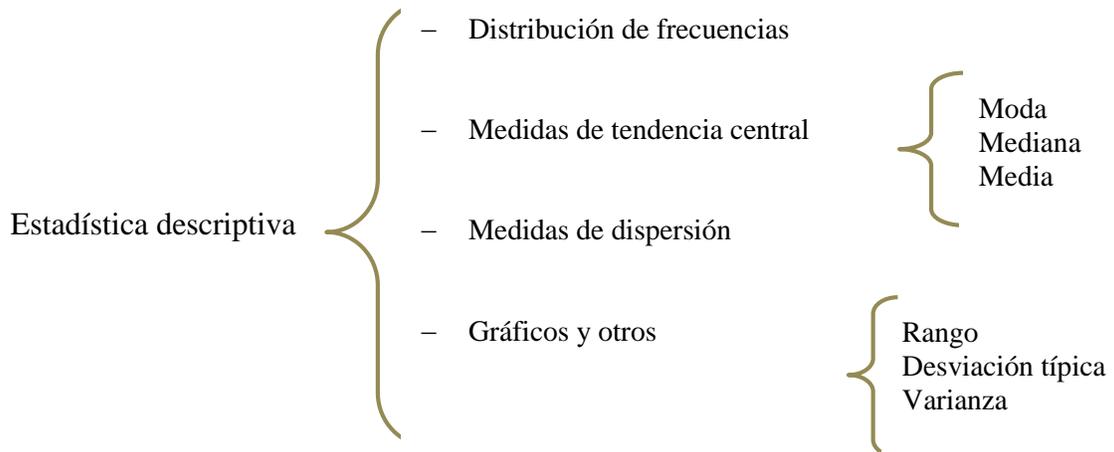
Dentro de los resultados esperados es proporcionar o disminuir la plasticidad en las arcillas, que es un indicador directo de la expansión de éstas.

Que el nivel de absorción de agua disminuya, para que los cambios volumétricos respecto a expansión o reducción no sean tan bruscos, para asegurar la seguridad y estabilidad de la estructura ante una mínima presencia de agua.

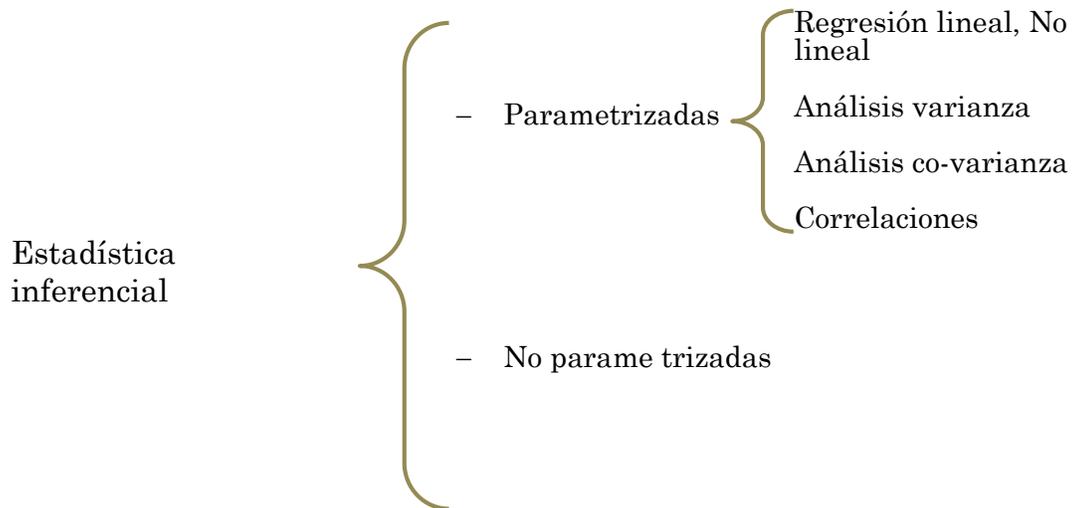
Todos los resultados que se alcancen estarán orientados a buscar la solución más óptima, es decir mejorar la calidad de estos suelos al menor costo posible.

1.11 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

1.11.1 Estadística descriptiva



1.11.2 Estadística inferencial



CAPÍTULO II

2 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Todas las obras de ingeniería civil se apoyan sobre el suelo de una u otra forma, y muchas de ellas además utilizan la tierra como elemento de construcción para terraplenes, diques y rellenos en general por lo que en consecuencia, su estabilidad y comportamiento funcional y estético estarán determinados, entre otros factores, por el desempeño del material de asiento situado dentro de las profundidades de influencia de los esfuerzos que se generan, o por el del suelo utilizado para conformar los rellenos.

Si se sobrepasan los límites de la capacidad resistente del suelo o si, aún sin llegar a ellos, las deformaciones son considerables, se pueden producir esfuerzos secundarios en los miembros estructurales, quizás no tomados en consideración en el diseño, productores a su vez de deformaciones importantes, fisuras, grietas, desplomos que pueden producir, en casos extremos el colapso de la obra o su inutilización y abandono.

En consecuencia, las condiciones del suelo como elemento de sustentación y construcción y las del cimiento como dispositivo de transición entre aquel y la subestructura, han de ser siempre observadas, aunque esto se haga en proyectos pequeños fundados sobre suelos normales a la vista de datos estadísticos y experiencias locales, y en proyectos de mediana a gran importancia o en suelos dudosos, infaliblemente, a través de una correcta investigación de mecánica de suelos.

En este capítulo se presenta “La estabilización de suelos” como una de las técnicas utilizadas con mayor frecuencia en la actualidad cuando los suelos, en su estado natural no cumplen los requisitos indispensables para ser empleados en una obra de ingeniería civil. El “Mejoramiento del suelo” consiste en modificar las características físico-mecánicas de los suelos mediante la aplicación de energía y/o sustancias que hacen que este mejore sus propiedades, donde el suelo una vez estabilizado pueda ser aprovechado con nuevas propiedades para el diseño y construcción de diversas obras.

Generalmente el mejoramiento de suelos tiene como principales objetivos aumentar la resistencia de los suelos, proporcionar o disminuir la permeabilidad en función de su uso, y reducir los cambios volumétricos (asentamientos y expansiones).

2.2 SURGIMIENTO DE LA MECÁNICA DE SUELOS

Al pasar de los años el auge de la ciencia y la tecnología trajo consigo el aumento de las cargas sobre los suelos, entonces el hombre comenzó a realizar estudios a los suelos para ver cómo podía mejorar tanto su comportamiento bajo cargas, como sus propiedades mecánicas. A partir del siglo XVIII los científicos e ingenieros comenzaron a realizar investigaciones en el campo de la mecánica de las masas de tierra, los primeros investigadores de esta época fueron los señores Coulomb y Ranking, bien conocidos en el campo de la mecánica aplicada y la física.

Solo fue hasta el inicio del siglo XX, que muchos ingenieros destacados se dieron a la tarea de revisar los trabajos de los primeros investigadores y a desarrollar métodos nuevos y más realistas de análisis de las masas de suelo, los más destacados en esta labor fueron, los trabajos de Fellenis en Suecia, Kogler en Alemania, Hogentogler en los Estados Unidos y sobre todo las contribuciones de Kart Terzaghi en Europa y los Estados Unidos. Gracias a los descubrimientos de estos hombres nace una nueva rama de la ingeniería civil, la mecánica de suelos y sus aplicaciones a los problemas prácticos, la ingeniería de suelos.

2.3 TIPOS DE PROBLEMAS EN LA INGENIERÍA DE SUELO

El primero se refiere a los suelos y las rocas tal como se encuentran en la naturaleza, por ejemplo, los edificios se cimientan corrientemente sobre el suelo sin alterar el mismo. El segundo se refiere a los problemas en que los suelos o las rocas se emplean como materiales de construcción, por ejemplo, en terraplenes para carreteras y ferrocarriles, en las presas de tierra y diques en las subrasante de las carreteras y aéreo pistas, se emplea la tierra como material de construcción.

2.4 SURGIMIENTO DE LA ESTABILIZACIÓN Y EL MEJORAMIENTO DE LOS SUELOS

Desde la antigüedad el hombre se dio cuenta que al adicionarle algunos productos a los suelos mejoraban sus características y por lo tanto el rendimiento de este, pero con el transcurso de los años estos métodos fueron siendo insuficientes para hacerle frente al aumento de las cargas que debían soportar las estructuras de suelo, como también las canteras de material con adecuadas características mecánicas, capaces de resistir dichas cargas. Esto fue ocasionado por la brutal explotación de las canteras que brindaban estos materiales lo cual ocasiono un daño irreversible al medio ambiente por lo que las entidades ambientales han reducido drásticamente el número de canteras de este tipo. Otro factor que ha empujado al hombre a fomentar la utilización e investigación de nuevos aditivos para la estabilización de los suelos ha sido la economía, debido a que en ocasiones la distancia de acarreo y el volumen del movimiento de tierra hace a la obra antieconómica, por lo que es necesario mejorar las características del suelo existente en el lugar para lograr que los mismos logren resistir las cargas que le tributarán.

Cuando un suelo presenta resistencia suficiente para no sufrir deformaciones ni desgastes inadmisibles por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable. El suelo natural posee a veces la composición granulométrica y la plasticidad, así como el grado de humedad necesario para que, una vez apisonado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como firme de un camino. Los suelos cuando no logran satisfacer lo expresado anteriormente es necesario estabilizarlo logrando así que cumplan los requisitos mínimos de utilización. En general puede decirse que todos los suelos pueden ser estabilizados, pero si la estabilización ha de lograrse por aportaciones de otros suelos o por medios de otros elementos (Por ejemplo, cemento, cal, cloruro de sodio) el costo de la operación puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir no posee determinadas condiciones.

2.5 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Para carreteras, la estabilización y mejoramiento de suelos en materiales granulares es un conjunto de técnicas que buscan incrementar el desempeño mecánico y la durabilidad de los materiales, y que son utilizadas en múltiples actividades en la ingeniería de pavimento.

Llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un 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 o bien, disminuir su plasticidad.

Cuando se trata de cimentaciones superficiales, ya sea de zapatas, o bien de losas de cimentación para edificación o cuando se trata de construir una estructura para un pavimento, por ejemplo, en muchas ocasiones nos encontramos con que el suelo del sitio, al nivel en que requerimos apoyar nuestra estructura, se encuentra formado por un material de características inadecuadas.

En este caso nos referiremos específicamente a un suelo arcilloso, de características plásticas, con riesgo de sufrir cambios volumétricos con los cambios de su humedad, y con una baja capacidad de soporte. Concretamente tenemos un suelo que debemos estabilizar para poder utilizarlo sin problemas. Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar los suelos en la construcción eran empíricos y como las demás actividades artesanas, se transmitían de generación en generación. Los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan principalmente en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación. Entre las aplicaciones de un suelo modificado o estabilizado se encuentran la mejora de los suelos granulares susceptibles a las heladas y el tratamiento de los suelos limosos y/o arcillosos para reducir los cambios de volumen.

2.5.1 Ventajas de los suelos estabilizados

2.5.1.1 Ventajas técnicas

- Permiten el empleo de los suelos de la traza, mejorando sus características.
- Proporcionan una elevada capacidad de soporte a la explanación, con lo que aumenta la vida de servicio del firme.
- Aseguran la estabilidad de la explanación, tanto por su insensibilidad al agua y a situaciones climáticas extremas (como las heladas), evitando así cambios de volumen por hinchamiento o retracción, como por su resistencia a la erosión.
- Disminuye las tracciones en las capas del firme, aumentando con ello la vida útil.

2.5.1.2 Ventajas económicas

- Un mayor empleo de suelos y otros materiales de la traza, a veces de características iniciales inadecuadas.
- Un ahorro en el transporte de materiales.
- Un acortamiento en el plazo de ejecución. (Estabilización)

2.6 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

- Estabilización Física
- Estabilización Química
- Estabilización Mecánica

2.6.1 Estabilización Física

Este se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Existen varios métodos:

- Mezclas de Suelos
- Geo textiles
- Vibro flotación (Mecánica de Suelos)
- Consolidación Previa

Mezclas de Suelos

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

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

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

Geo textiles

Los geo textiles son membranas sintéticas permeables o impermeables, resistentes a la tensión y al punzonamiento que sirven como elemento de separación refuerzo, filtración y drenaje en las construcciones. Los geotextiles constituyen un componente fundamental en los proyectos de ingeniería en la actualidad, pero su costo en el mercado internacional es alto. Es por ello que en nuestro país se utiliza solamente con fines experimentales. A pesar de que la estabilización incluye de forma general la compactación, drenaje y protección contra la erosión e infiltración de la humedad en un suelo, este término se ha ido restringiendo a un solo aspecto la modificación del propio suelo.

Vibro flotación (Mecánica de Suelos)

Respecto a la mejora de la resistencia y por ende de la capacidad de carga del suelo, los procedimientos que se utilizan pretenden generalmente, aumentar las densidades de los suelos, por lo que las técnicas utilizadas pueden ser de compactación, vibro

flotación, precarga, utilización de diferentes suelos o la mezcla de ellos, la adición de aditivos, etc. El método de vibro flotación consiste en introducir un dispositivo en el perfil del suelo, una vez dentro, el aparato vibra e inyecta agua simultáneamente. Esto ocasiona el reacomodamiento de las partículas de suelo, aumentando así la densidad. Es un método de mejoramiento para suelos granulares, fundamentalmente, gravas o arenas con un pequeño porcentaje de finos.

Consolidación Previa

Se denomina consolidación de un suelo a un proceso de reducción de volumen de los finos cohesivos (y plásticos), provocado por la actuación de solicitaciones (cargas) sobre su masa y que ocurre en el transcurso de un tiempo generalmente largo. Producen asentamientos, es decir hundimientos verticales en las construcciones que pueden llegar a romper si se producen con gran amplitud.

Al observar los depósitos de material muy suaves situados en el fondo de una masa de agua, por ejemplo, un lago, se nota que el suelo reduce su volumen conforme pasa el tiempo y aumentan las cargas sobre el suelo, a esto se les llama proceso de consolidación.

Frecuentemente ocurre que durante el proceso de consolidación permanece esencialmente igual la posición relativa de las partículas sólidas sobre un mismo plano horizontal. Así, el movimiento de las partículas de suelo puede ocurrir sólo en la dirección vertical, proceso denominado consolidación unidimensional.

La consolidación de un suelo es un proceso lento, puede durar meses y hasta años. Es un proceso asintótico, es decir, que al comienzo es más veloz, y se va haciendo cada vez más lento, hasta que el suelo llega a una nueva situación de equilibrio en la que ya no se mueve.

El no tomar en cuenta este posible movimiento del suelo al proyectar una estructura sobre él puede llevar a consecuencias catastróficas tales como la inclinación, fisuración e incluso el colapso de la misma. En muchos casos es necesario pre-consolidar el suelo antes de proceder a la construcción de una obra importante como puede ser, por

ejemplo, un edificio o una carretera. La pre consolidación se hace en el terreno con un peso semejante o mayor que el que deberá soportar una vez construida la obra, para esto se deposita en la zona interesada una cantidad de tierra con el peso equivalente de la obra.

2.6.2 Estabilización química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

En este trabajo el tema fundamental que se abordará será el de la estabilización química por lo que se le dará mayor énfasis a los distintos tipos de estabilización química que existen en el mundo y en nuestro país.

Como un ejemplo de la gran aceptación de estas técnicas tenemos que ya en la norma española para carreteras se contempla la utilización de explanaciones que hayan sido estabilizadas con productos químicos.

A modo de comentario se dice que el uso de estabilizadores químicos, que eran originados por desechos de las grandes industrias puede decirse que ocurrió de manera fortuita; por derrames que ocurrían en el transporte de los mismo, las personas del lugar notaron como estos productos al reaccionar con el suelo transformaban al mismo; por ejemplo, notaron que disminuía el polvo en los caminos y mejoraba la impermeabilización de estos. Esto motivo la investigación de estos productos para su uso comercial.

Se demostró que las cargas superficiales electrostáticas de los agentes activos (Surfactantes), y los ácidos minerales, también cargados, estaban reaccionando con las arcillas en los suelos y modificando las mismas. Exactamente como estaba ocurriendo no pudo comprenderse completamente en aquel momento debido a la complejidad química de las arcillas y al tamaño diminuto de muchas de las partículas arcillosas (menos de 2 micrones).

- Estabilización con cemento portland: Aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Estabilización con productos asfálticos: Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- Estabilización con cloruro de sodio: Impermeabilizan y disminuye los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Estabilización con cloruro de calcio: Impermeabilizan y disminuye los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Estabilización con escorias de fundición: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Estabilización con polímeros: Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Estabilización con cal

La cal hidratada es el agente estabilizador más usado a través de la historia, pero solo recientemente se han hecho estudios científicos relacionados a su empleo como estabilizador de suelos y se han cuantificados sus magníficos resultados.

Cuando tenemos arcillas muy plásticas se puede disminuir dicha plasticidad y consecuentemente los cambios volumétricos asociados de la misma variación en los contenidos de humedad, con el solo hecho de agregarle una pequeña proporción de cal.

Este es un método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y aumentar la resistencia. Los porcentajes que agregan varían del 2 al 6% con respecto al suelo seco que se estabilizara, con estos porcentajes se consigue estabilizar la actividad de las arcillas obteniéndose un descenso en el índice de plasticidad y un aumento de la resistencia.

Es recomendable no usar más de un 6% ya que con esto se aumenta la resistencia, pero también ocasiona un incremento en la plasticidad.

Se ha determinado que al mezclar las arcillas con la cal apagada los iones de calcio sustituyen algunos iones metálicos presentes en la película de agua que rodea a las partículas de arcilla y que son responsables de los cambios volumétricos, además, si el suelo tratado contiene suficiente sílice y alúmina estos pueden reaccionar formando silicatos de calcio y alúmina; los cuales tienen un gran poder cementante, lo que implica que al agregar cal también se logra aumentar la resistencia del suelo.

La dosificación dependerá del tipo de arcilla; se agregará de 1% al 6% de cal por peso seco. Este porcentaje debe determinarse en el laboratorio, pero lo más común en la mayoría de los casos es la utilización de un porcentaje cerca del 3%.

Estabilización con cemento

El cemento mezclado con el suelo mejora las propiedades de éste desde el punto de vista mecánico.

Siendo los suelos por lo general un conjunto de partículas inertes granulares con otras activas de diversos grados de plasticidad, la acción que en ellos produce el cemento es doble. Por una parte, actúa como conglomerante de las gravas, arenas y limos desempeñando el mismo papel que en el hormigón. Por otra parte, el hidrato de calcio, que se forma al contacto del cemento con el agua, libera iones calcio que, por su gran afinidad con el agua, le quitan algunas de las moléculas que están interpuestas entre cada dos laminillas de arcilla. El resultado de este proceso es la disminución de la porosidad y de la plasticidad, así como un aumento en la resistencia y en la durabilidad del material estabilizado.

Es posible utilizar todos los tipos de cementos, pero normalmente se emplean los de fraguado y endurecimiento normales. En algunos casos, para contrarrestar los efectos de la materia orgánica son recomendables los cementos de alta resistencia y si las temperaturas son bajas se puede recurrir a cementos de fraguado rápido o se utiliza el cloruro de calcio como aditivo.

Este tipo de estabilización es de uso cada vez más frecuente y consiste comúnmente en agregar cemento Portland en proporción de un 7% a un 16% por volumen de mezcla.

Al mejorar un material con cemento Portland se piensa principalmente en aumentar su resistencia, pero además de esto, también se disminuye la plasticidad, es muy importante para que se logren estos efectos, que el material por mejorar tenga un porcentaje máximo de materia orgánica del 34%.

La mayoría de los tipos de suelo que encontramos pueden estabilizarse con cemento con excepción de los que contienen altos porcentajes de materia orgánica. Por otra parte, los suelos de arcilla o limo requerirán un mayor porcentaje de cemento para lograr los resultados esperados lo cual encarecería la estabilización.

El éxito de la estabilización con cemento depende de tres factores:

- Contenido apropiado de cemento
- Contenido apropiado de humedad
- Adecuada compactación

Por esto las mezclas deben ser sometidas a diversos ensayos como son el de compactación, durabilidad y compresión que aparte de su objeto específico servirán para dosificar el cemento que se empleará en la mezcla.

Dosificación del Cemento

Si mediante el análisis granulométrico y la determinación de los límites de Atterberg se ha procedido a la clasificación del suelo de acuerdo a la H.R.B.

(Highway Research Board o Departamento de Investigación Sobre Carreteras)

TABLA 2.1 La dosificación del cemento

(Clasificación AASHTO)	Porcentaje de cemento (sobre peso seco del suelo)
A-1	3-8
A-2	5-9
A-3	5-10
A-4	7-12
A-5	8-14
A-6	9-15
A-7	9-15
Suelos orgánicos	No utilizables

Fuente: Vu lam nguyen

Existen principalmente dos formas o métodos para estabilizar con cemento Portland, una es la llamada estabilización del *tipo flexible*, en el cual el porcentaje de cemento varía del 1 al 4%, con esto solo se logra disminuir la plasticidad y el incremento en la resistencia resulta muy bajo, las pruebas que se les efectúan a este tipo de muestras son semejantes a las que se hacen a los materiales estabilizados con cal.

Otra forma de mejorar el suelo con cemento, se conoce como *estabilización rígida*, en ella el porcentaje de cemento varía del 6 al 14%, este tipo de mejoramiento es muy común en las bases, ya que resulta muy importante que éstas y la carpeta presenten un módulo de elasticidad semejante, ya que con ello se evita una probable fractura de la carpeta, ya que ambos trabajan en conjunto; para conocer el porcentaje óptimo a emplear se efectúan pruebas de laboratorio con diferentes contenidos de cemento.

2.6.3 Estabilización mecánica

Compactación

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto mutuamente, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles (Tensión superficial, Tensión capilar, Permeabilidad, Compresibilidad y Asentamiento).

La compactación o reducción de la relación de vacíos se produce de varias maneras: por la reorientación de las partículas, fractura de los granos o de las ligaduras entre ellos seguida por reorientación y la flexión o distorsión de las partículas. La energía que se gasta en este proceso es suministrada por el esfuerzo de compactación de la máquina de compactar. Los métodos empleados para la compactación de suelos dependen del tipo de materiales con que se trabaje en cada caso, en los materiales puramente friccionantes como la arena, los métodos vibratorios son los más eficientes, en tanto que en suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso del tipo de partículas que componen el suelo y de la manera como se aplica el esfuerzo de compactación. En un suelo cohesivo la compactación está acompañada, principalmente, por distorsión y reorientación, las cuales son resistidas por las fuerzas de atracción-repulsión. A medida que la humedad del suelo aumenta, estas fuerzas disminuyen, la resistencia se hace menor y el esfuerzo más efectivo. Mientras, en un suelo no cohesivo o en una roca partida, la compactación del suelo se logra principalmente por la reorientación de los granos, aunque la fractura de los granos en los puntos de contacto es algunas veces un factor secundario importante, esta reorientación es resistida por el rozamiento entre las partículas. La tensión capilar de la película de humedad entre los granos aumenta la presión de contacto y por tanto la fricción. A medida que la humedad aumenta, la tensión capilar disminuye y el esfuerzo de compactación se hace más efectivo. Sin embargo, si la humedad es muy alta, la compactación y la reducción de la relación de vacíos de los suelos, tanto cohesivos como no cohesivos, los lleva a un estado próximo a la saturación. El esfuerzo neutro que se crea impide que continúe disminuyendo la relación de vacíos, y por lo tanto el esfuerzo adicional de compactación que se aplique se perderá. La saturación es por lo tanto el límite

teórico de la compactación para una humedad dada, la cual no sería posible alcanzar por medios mecánicos.

De forma general, la compactación es el medio más adecuado y económico para regular las propiedades del suelo o de la roca. Por medio de la compactación generalmente es posible compensar las deficiencias en la calidad y el deterioro de las propiedades como consecuencia del aumento de humedad. Sin embargo, la única propiedad que no es posible mejorar con la compactación es la expansividad, esta debe regularse por la apropiada selección de los materiales.

Beneficios de la compactación:

Disminuye la deformación del suelo.

Si la estructura se construye en el suelo sin afirmar o afirmado con desigualdad, el suelo se hunde dando lugar a que la estructura se deforme (asentamientos diferenciales).

Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo.

Si existen vacíos en la masa de suelo, el agua puede penetrar y rellenar esos vacíos; el resultado sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y la contracción del mismo durante la estación seca. Aumenta la capacidad para soportar cargas.

Los vacíos producen debilidad del suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas. Estando más unidas las partículas, el suelo puede soportar cargas mayores debidas a que las partículas mismas que soportan mejor.

2.7 REQUISITOS DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS

Un agente estabilizador satisfactorio debe proporcionar las cualidades requeridas y además debe satisfacer las condiciones siguientes:

- Debe ser compatible con el material del suelo.
- Debe ser permanente.
- Debe ser fácil de manejar y preparar
- Debe tener bajo costo. Ningún material llena todos los requisitos y la mayoría son deficientes en la última condición, el costo.

2.8 FUNCIONES DEL MEJORAMIENTO DE SUELOS

Luengo, T (1999). Cada estabilizador debe cumplir al menos con una de las siguientes funciones:

- Incrementar la resistencia a la compresión, reducir su tendencia a la dilatación o contracción aglomerando las partículas de suelo unas a otras.
- Reducir o eliminar completamente la absorción de agua (que causa dilataciones, contracciones y erosión) sellando todos los vacíos y poros, y cubriendo las partículas de arcilla con una película impermeable.
- Reducir el agrietamiento proporcionando flexibilidad, que permite que el suelo se expanda o contraiga en algún grado.
- Reducir la expansión y contracción excesiva.

2.9 EQUIPOS QUE SE REQUIEREN EN UNA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

- De corte, pulverización y mezclado
 - Arado con disco
 - Escarificadores
 - Motoniveladora
- De extensión y nivelación
 - Motoniveladoras
 - Carrotanques - Irrigadores
- De compactación
 - Cilindros vibratorios lisos, pata de cabra, etc.
 - Cilindros Neumáticos
- Equipos especializados
 - Inyección – Irrigadores de lechada – Distribuidores de cemento o cal.
 - Irrigadores de asfalto
 - Plantas estacionarias – terminadoras

2.10 ESPECIFICACIONES MÍNIMAS

Indudablemente en cada trabajo de estabilización es necesario fijar unas especificaciones particulares, no obstante, si se pueden predeterminar especificaciones mínimas generales para las técnicas hasta ahora más usuales en nuestro país.

2.11 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EVALUADAS EN LOS SUELOS

2.11.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (Humedad) de suelos (DESIGNACIÓN ASTM D2216)

El contenido de humedad de una masa de suelo está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio es por medio del secado al horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, o sea:

$$w\% = \frac{W_w}{W_{ss}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

$W\%$ = Contenido de humedad, en por ciento.

W_w = Peso del agua presente en el suelo.

W_{ss} = Peso del suelo después de secado al horno.

Dentro del suelo, el agua se presenta en dos formas, libre y retenida.

- El agua libre: Es el agua que circula a través del suelo sin dificultad alguna y por la acción de la gravedad puede ser drenada.
- El agua retenida: Se encuentra retenida dentro del suelo y la causa de su formación se define:
 - Agua higroscópica: Es la que absorbe un suelo de la humedad del aire
 - Agua capilar: Es la retenida por efecto de la tensión superficial.

La muestra que se tome para la determinación de humedad deberá ser representativa del suelo cuya humedad se desea conocer. Si dicha muestra de humedad va a ser tomada en el campo y transportada en el laboratorio para hacer la determinación correspondiente, deberá colocarse en un recipiente que tenga una tapa metálica o en otro que tenga la capacidad de poder conservar la humedad.

La determinación de la humedad dependerá del tamaño máximo del agregado, por lo que se recomienda lo siguiente.

TABLA 2.2 Peso recomendado para el análisis del contenido de humedad

Metodología

Es necesario entender que a un suelo húmedo se le debe aplicar calor a temperaturas que superen los 100 °C para que se garantice que el agua que se encuentra dentro del suelo se evapore secándolo.

Actu *Fuente: Manual de ensayos de laboratorio U.A.J.M.S* lo de humedad,

Tamiz que retiene más del 10% del	Peso recomendado de la muestra
2.00 mm (No. 10)	100 a 200
4.75 mm (No. 4)	300 a 500
19.00 mm (3/4")	500 a 1000
37.50 mm (1 ^{1/2} ")	1500 a 3000
75.00 mm (3")	5000 a 10000

teniendo resultados variados, pero es preciso definir que el primero de los métodos que mencionaremos a continuación en una lista es el estandarizado, por lo que los demás deberían considerar al mismo como base de una posible calibración o corrección.

Métodos estandarizados

- Método horno
- Método speedy

Métodos no estandarizados

- Método de la hornalla

- Método del alcohol

2.11.2 Ensayo de Granulometría

El análisis mecánico del suelo es la determinación del rango del tamaño de las partículas presentes en un suelo, expresado como porcentaje del peso (o masa) seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo. Para el análisis realizado se siguieron las orientaciones del manual de ensayos de suelos y materiales de la (A.B.C).

- Análisis por cribado: para tamaños de partículas mayores que 0.075mm (Tamiz No. 200) de diámetro.
- Análisis hidrométrico: para tamaños de partículas menores de 0.075m (Tamiz No. 200) de diámetro.

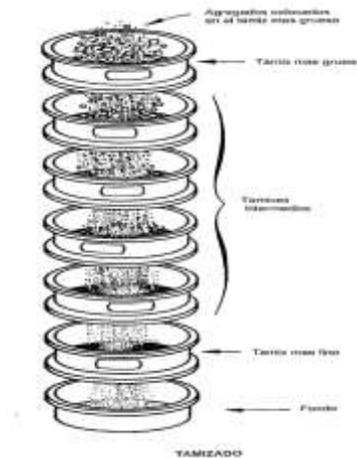
2.11.2.1 Análisis granulométrico por tamizado (DESIGNACIÓN ASTM D-422 AASHTO T-88)

Este análisis consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas o tamices que tiene aberturas progresivamente más pequeñas (**Figura 2.1**). Primero el suelo se seca en una estufa, luego se tamiza este suelo y se determina la masa retenida en cada malla o tamiz. Los resultados de este análisis se expresan generalmente como porcentaje del peso total del suelo que ha pasado por las diferentes mallas.

Para esto se tomó una muestra de aproximadamente 300g y se colocan en el horno dentro de bandejas por un periodo no inferior a las 24h, luego de pasado este tiempo se retiran las muestras del horno y se le toma el peso del material seco para proseguir a colocar las muestras en saturación durante un periodo de 24h. Después de terminado el periodo en el que la muestra está en saturación se procede al lavado de la muestra de suelo con el tamiz #200, logrando así eliminar los limos y las arcillas. Lo que es retenido en este tamiz se coloca nuevamente en el horno para su secado durante 24h como mínimo. Luego de cumplido este plazo se pesa la muestra, las cuales serán pasadas a través de un conjunto de tamices que tienen aberturas progresivamente más

pequeñas. Este conjunto de tamices se sacude por un tiempo aproximado de 15 minutos, luego se pesa cuidadosamente el suelo que quedo retenido en cada tamiz.

Figura 2.1 Juego de tamices



Fuente: Braja M. Das

2.11.2.2 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (DESIGNACIÓN ASTM D-422)

Este ensayo se basa en el principio de la sedimentación de los granos de suelo en agua. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua sus partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de su forma, tamaño y peso. El peso específico está dado por la relación: $Y = P/V$ (Y = peso específico; P = peso del cuerpo y V = volumen). El peso específico se va a expresar en g/cm^3 . Para este ensayo se tomó una muestra de 50g pasadas por el tamiz #200 y que se hayan secado en el horno por un tiempo aproximado de 24h, esta muestra es colocada en una probeta de 250ml y se le agregan 125ml de una solución desfloculante previamente preparada, posteriormente se deja reposar esta mezcla por un lapso de 24h. Luego de cumplido este tiempo se procede a realizar la dispersión de las partículas del suelo batiendo la probeta por 1 min, después de esto se coloca la muestra en una probeta de 1000ml completando este volumen mezclando el contenido con agua destilada (que deberá estar a la misma temperatura que la del estanque en el que se colocaran las muestras). Luego de sacudir la probeta, poner sobre la mesa e introducir el hidrómetro tomando lecturas en los

siguientes intervalos de tiempo 1, 2, 3, 4 minutos, realizando igualmente lecturas del termómetro. Realizar todos cálculos haciendo las correcciones necesarias.

Cálculos:

– Corrección de las lecturas del Hidrómetro

– Corrección por menisco (cm)

Hidrómetro tipo 152 H: cm=1.0 g/litro

– Lectura de Hidrómetro corregida

$$R = R' + cm \quad \text{Ecuación 2.2}$$

– Corrección por temperatura (ct)

$$Rc = R + Ct \quad \text{Ecuación 2.3}$$

– Calculo del diámetro de las partículas

$$D(mm) = K \sqrt{\left(\frac{L}{T}\right)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

– Calculo del porcentaje más fino

$$\% \text{ mas fino} = \frac{100 * a * Rc}{Ws} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

2.11.3 Determinación del peso específico de los suelos (DESIGNACIÓN ASTM D854 AASHTO T-100)

La realización de los laboratorios es la parte del curso de Mecánica de Suelos, que sirve para confirmar los conceptos teóricos desarrollados en clase, con el comportamiento real de los fenómenos físicos; para luego aplicar con confianza los conceptos teóricos en el estudio.

El peso específico relativo es una característica de líquidos y de los sólidos. En esta práctica el peso específico que se hallará en laboratorio será para sólidos. Y se lo determina mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma = W_s / (W_{fw} + W_s - W_{fsw}) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Dónde:

γ = Peso específico relativo de un suelo cualquiera

W_s = Peso del suelo seco

W_{fw} = Peso del frasco lleno de agua

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

Dichas magnitudes se pueden medir en el laboratorio.

Nombraremos los materiales con los que trabajamos en el laboratorio para llevar a cabo esta práctica, los cuales son:

- Frasco volumétrico, con marca de enrase de 500 ml.
- Termómetro con aproximación de 0.01°C.
- Balanza con aproximación de 0.1 gr.
- Pipeta.
- Accesorios para baño maría.
- Muestra de suelo.
- Alcohol, jabón.
- Hielo.

Para la realización de la práctica se realizaron los siguientes pasos que a continuación se describirán:

- Pesamos 80 gr de suelo con humedad natural en la balanza de 0,01 gr de precisión.
- En un plato y saturando con agua formamos una pasta, para luego colocarla dentro del frasco volumétrico con mucho cuidado de perder muestra en el proceso.
- Se tiene que extraer todo el aire atrapado dentro del suelo, para esto se debe rolar el frasco con mucho cuidado.
- Someter el frasco de agua con suelo a efectos de temperatura dentro de un baño maría, hasta que alcance la temperatura de 60°C.
- Llenar el frasco con agua a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase.
- Pesar el frasco y luego medir la temperatura en el centro del frasco volumétrico.

- Someter a enfriamiento el frasco para repetir unas tres veces el proceso a diferentes temperaturas.

Una vez obtenidos los puntos, procedimos a vaciar el contenido en un plato para introducir al horno y obtener el peso seco una vez transcurridas las 24 hrs.

2.11.4 Determinación de los límites de consistencia líquido y plástico (DESIGNACIÓN ASTM D4318 AASHTO T-89 T-90)

Los **límites de Atterberg** o **límites de consistencia** se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en **estado sólido**, cuando está seco. Al agregársele agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de **semisólido**, **plástico**, y finalmente **líquido**. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

Partiendo de la hipótesis de que la pendiente de la relación número de golpes ha contenido de agua representada a escala semilogarítmica es una línea recta, en la cual el límite líquido puede ser obtenido a partir de cualquier punto de la curva, lambe ha sugerido el empleo de la siguiente expresión:

$$L.L = w * \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

L.L = Limite liquido calculado de suelo.

W = Porcentaje de humedad arbitraria del suelo con respecto al peso seco.

N = Numero de golpes necesarios para cerrar la ranura en la copa de casa grande, correspondiente a w.

LÍMITE LÍQUIDO

- Primeramente, se debe verificar una calibración de la altura de caída de la copa de Casagrande, esta debe tener 1 cm. de caída caso contrario debe regularse para que esto suceda.
- Los ranuradores tienen una parte con dimensiones adecuadas para realizar la medición de caída de la copa por lo tanto utilizar los mismos.
- Se toma la muestra preparada con anterioridad, se agrega agua y se mezcla con la espátula hasta obtener la pasta suave y homogénea.
- Colocar una porción de esta pasta a la copa de Casagrande con un espesor horizontal de 1 cm. y hacer con el ranurador apropiado la ranura correspondiente, el ranurador deberá mantenerse en todo el recorrido firme y normal a la superficie interior de la copa.
- Acciónese la copa a razón de dos golpes por segundo, contando hasta que la ranura se cierre por lo menos 1.27 cm, anotar el número de golpes.
- Seguidamente cortar con la espátula en forma perpendicular a la porción que pase por el punto donde se cerró la ranura este material debe colocarse dentro de una tara pequeña e inmediatamente ser pesada antes de ser introducida al horno.
- Todo este proceso se debe repetir unas cinco veces a distintas humedades del suelo se considera que por lo menos algunos golpes estén por debajo y arriba de los 25 golpes.
- A las 24 horas se debe pesar todas las muestras salidas del horno y así tener los datos completos para el cálculo del límite líquido.

LÍMITE PLÁSTICO

- Mezclar Homogéneamente el resto de material preparado con anterioridad pero que la pasta vaya perdiendo humedad y se torne plástica.
- Se toma una porción de ese material y se comienza a rolar sobre un vidrio hasta obtener rollitos de 3 mm. de espesor. Repítase este paso hasta que la superficie de los rollitos presente agrietamientos.

- Una vez que se presentan los agrietamientos o rajaduras pequeñas se debe cortar el rollito en ese sector para guardar dentro de las taras y pesar antes de introducir al horno. Se debe repetir este proceso por lo menos unas tres veces.

A las 24 horas se debe sacar las muestras del horno y ser pesadas para completar la información y obtener el límite plástico.

El límite plástico se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$L.P = \frac{(Ph - Ps)}{Ps} * 100 = \frac{Pw}{Ps} * 100 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Donde:

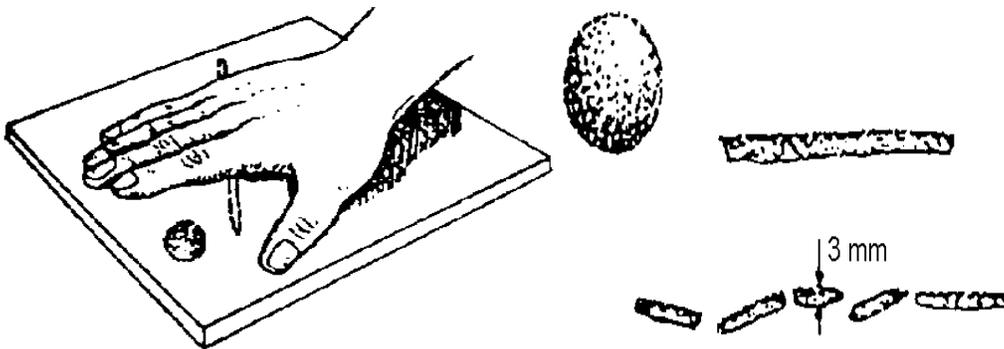
L.P = Humedad correspondiente al límite plástico en %.

Ph = Peso de los trocitos de filamentos húmedos en gramos.

Ps = Peso de los trocitos de filamentos secos en gramos.

Pw = Peso del agua contenida en los filamentos pesados en gramos.

Figura 2.2 Ensayos de plasticidad



Fuente: Braja M. Das

TABLA 2.3 Plasticidad de los suelos

ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Se denomina índice de plasticidad o índice plástico (I.P) a la diferencia numérica entre los límites líquido y plástico, e indican el margen de humedad dentro del cual se encuentran en estado plástico tal como lo definen los ensayos.

El índice plástico depende generalmente de la cantidad de la arcilla del suelo.

Co1 Fuente: (en *Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Application*.
res1 Aysen, A. 2002).

adecuadas para cierto uso.

Plasticidad	Descripción del suelo	Rango IP
Nula	Limo	0 - Ecuación 2.9
Baja	Limo con trazas de arcilla	4 - 15
Media	Limo arcilloso Arcilla limosa	16 - 30
Alta	Arcilla limosa Arcilla	> 31

La fórmula del índice plástico es:

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

2.11.5 Ensayo de clasificación de suelos

2.11.5.1 Sistema de clasificación AASHTO (DESIGNACIÓN ASTM D3282 AASHTO M-145)

Hace varios años, los organismos viales de los EE.UU. de M.A., sugirieron diferentes clasificaciones para los suelos, hoy en día todas esas clasificaciones han sido agrupadas

en una sola, que se basa en la que originalmente propuso el Bureau of Public Roads en 1929.

Los suelos se clasifican en siete grupos, basándose en la composición granulométrica, en el límite líquido y en el índice de plasticidad de un suelo, la evaluación de cada grupo hace por medio de su “Índice de Grupo”, el cual es calculado mediante la fórmula empírica.

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde:

- $a = \% \text{pasa } N^{\circ}200 - 35\%$ (si $\%N^{\circ}200 > 75$, se anota 75, si es < 35 , se anota 0)
- $b = \% \text{pasa } N^{\circ}200 - 15\%$ (si $\%N^{\circ}200 > 55$, se anota 55, si es < 15 , se anota 0)
- $c = L. \text{ liquido} - 40\%$ (si $LL > 60$, se anota 60, si es < 40 , se anota 0)
- $d = I. \text{ plasticidad} - 10\%$ (Si $IP > 30$, se anota 30, si es < 10 , se anota 0)

Para la clasificación del suelo en Bolivia se utiliza fundamentalmente el método AASHTO. Para el análisis realizado se siguieron las orientaciones del manual de ensayos de suelos y materiales de la (A.B.C) correspondiente a “sistema de clasificación AASHTO (DESIGNACIÓN ASTM D3282 AASHTO M-145) y se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en la granulometría y los límites de consistencia.

TABLA 2.4 Tabla para la clasificación AASHTO

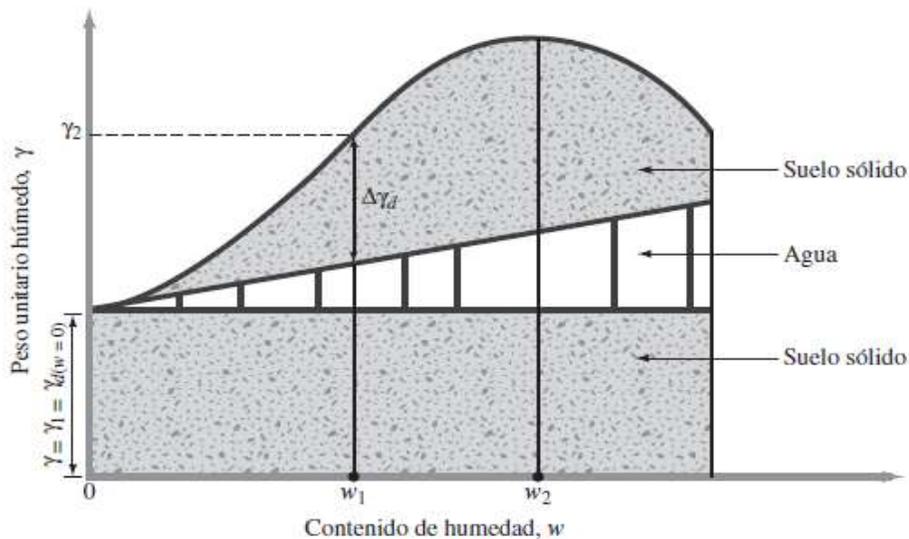
Clasificación General	Materiales granulares (35% como mínimo de lo que pasa el tamiz N° 200)						Materiales de arcilla-limo (más de 35% del total de la muestra que pasa el tamiz N° 200)				
Clasificación de grupo	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			A-7-5 A-7-6	
Porcentaje de material que pasa el tamiz N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 min								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min	36 min	
Características de la fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL:	6 máx.		NP	40 máx.	41 min	40 máx.	40 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min
IP:				10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min
Índice de grupo:	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.

Fuente: AASHTO

2.11.6 Ensayo de compactación de suelos

Según Braja M. Das (1985), en la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierras y muchas otras estructuras de ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos. La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos. La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de la estructura e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes. Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos de pata de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación del suelo. La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles. La importancia de la compactación de suelos estriba en el aumento de la resistencia y disminución de la capacidad de deformación que se obtiene al someter el suelo a técnicas convenientes, que aumentan el peso específico seco, disminuyendo sus vacíos.

Figura 2.3 Principios de la compactación



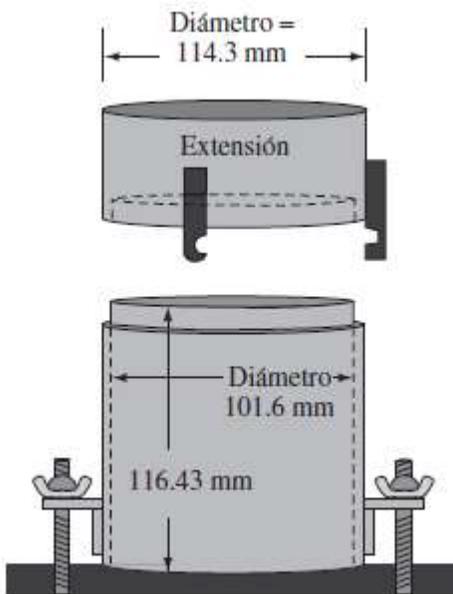
Fuente: Braja M. Das

2.11.6.1 Relaciones de peso unitario-humedad en suelos Método estándar (DESIGNACIÓN ASTM D689 AASHTO T-99)

En la prueba Proctor, el suelo se compacta en un molde que tiene un volumen de 943.3 cm³.

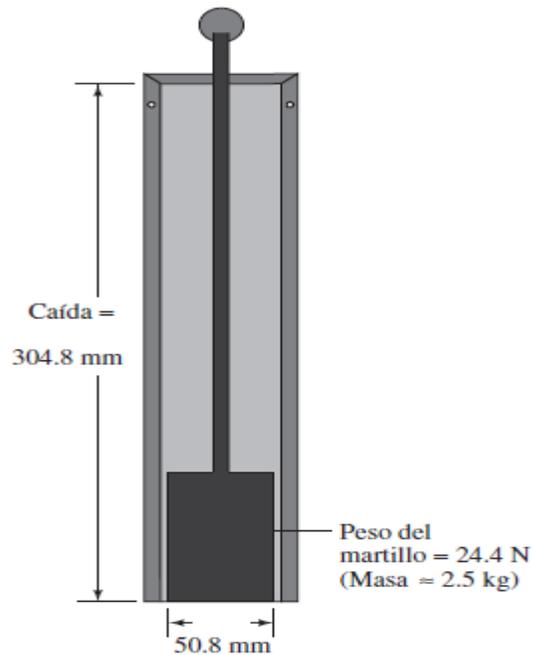
El diámetro del molde es 101.6 mm. Durante la prueba de laboratorio el molde se une a una placa de base en la parte inferior y a una extensión en la parte superior (figura 2.4). El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego es compactado en tres capas iguales por un martillo (figura 2.5) que entrega 25 golpes a cada capa. El martillo pesa 24.4 N.

Figura 2.4 Molde cilíndrico



Fuente: Braja M. Das

Figura 2.5 Martillo apisonador



Fuente: Braja M. Das

Para cada prueba, el peso unitario húmedo se puede calcular como:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Dónde: W= Peso del suelo compactado en el molde

V (m)= Volumen del molde

Para cada prueba, el peso unitario seco se puede calcular como:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{W_{(%)}}{100}} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

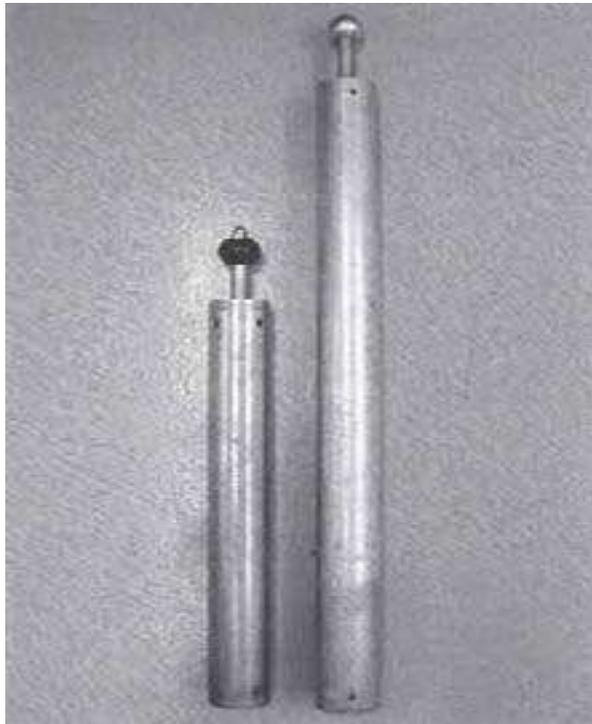
Dónde: W (%)= Porcentaje de contenido de humedad

2.11.6.2 Relaciones de peso unitario – Húmedo en los suelos Método modificado (DESIGNACIÓN ASTM D422 AASHTO T-180)

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación en campo, la prueba proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. Esto se refiere a veces como la prueba proctor modificada (Norma ASTM D-422 y Norma AASHTO T-180). Para la realización de la prueba proctor modificada se utiliza el molde, con un volumen de 2124 cm³, el suelo es compactado en cinco capas por un martillo que pesa 44.5 N (masa =4.536 kg) y tiene una caída de 457.2 mm.

El número de golpes de martillo para cada capa es de 56. La figura 2.6 muestra los martillos utilizados para las pruebas proctor estándar y modificada.

Figura 2.6 Martillos utilizados en la prueba estándar y modificada



Fuente: Braja M. Das

2.11.7 Determinación de la relación de soporte de los suelos en el laboratorio (CBR) relación soporte de california (DESIGNACIÓN ASTM D1883 AASHTO T-193)

El ensayo CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) evalúa la capacidad de soporte de los suelos de la sub rasante, capa de subbase y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad. Este es uno de los parámetros necesarios obtenidos en los estudios geotécnicos previos a la construcción, como también lo son el ensayo proctor y los análisis granulométricos del terreno.

Este método de ensayo se aplica principalmente a la evaluación de la resistencia de los materiales con tamaño máximo de las partículas menores de $3/4$ ". Este índice también se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de explanaciones, aunque es también aplicable a capas de base y sub base de los pavimentos. El espécimen de suelo con el que se realiza la prueba (CBR) está confinado en un molde de 15.3 cm de diámetro y de 17.8 cm de altura. La energía que se utilizó fue la modificada donde se ejecutará el ensayo con un contenido de humedad constante (humedad óptima) y número de golpes fijos (56). En el ensayo realizado se siguieron las orientaciones del manual de ensayo de suelos y materiales de la (A.B.C) bajo la designación **ASTM D 1883**.

Se tomaron 3 muestra de 5000g de suelo las cuales serán compactadas dentro de un molde con unas dimensiones aproximadas de $h=17.8\text{cm}$ y $d=15.3\text{cm}$. La compactación se realizará en 5 capas con la energía del martillo modificado aplicando 56 golpes por cada una de ellas. A cada muestra se le agregara la suficiente agua para que alcance la humedad óptima obtenida en el ensayo Proctor Modificado. En general el proceso de preparación de la muestra es muy similar al del Proctor, por lo que después de realizado todos los procesos expuestos anteriormente se pesa la muestra registrando los valores antes de la inmersión de la muestra al agua. Posteriormente se les colocan a las probetas las sobrecargas y estas se colocan en inmersión durante un periodo de cuatro días, en los cuales se tomarán lecturas de hinchamiento con un extensómetro. Al cuarto día

estas muestras son sacadas y colocadas en la prensa donde serán ensayadas, tomando lecturas para diferentes valores de penetración.

Ecuaciones para el cálculo del CBR.

$$CBR = \frac{\text{carga unitario del ensayo}}{\text{carga unitario patron}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

El cálculo para el % de expansión se calcula con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ exp} = \frac{|L_f - L_i|}{h} * 100 \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Donde:

% exp = Porcentaje de expansión

Lf = Lectura final del extensómetro (cm)

Li = Lectura inicial del extensómetro (cm)

h = Altura total del espécimen

2.11.8 Ensayo de absorción capilar (MANUAL DE LABORATORIO PARA LOS ENSAYOS Rocamix)

El ensayo de Ascensión Capilar tiene como objetivo determinar la cantidad de agua absorbida en la muestra y el tiempo que puede permanecer bajo la acción del agua sin destruirse, es decir la permeabilidad de la muestra.

Las probetas utilizadas para la realización de este ensayo se obtuvieron con el molde del proctor estándar y energía modificada, siguiendo para su confección los pasos a realizar para este tipo de ensayo, que ya fue descrito anteriormente. Para este análisis se tomaron como referencia una muestra elaborada con el molde de proctor estándar, las cuales fueron depositadas en una bandeja con agua y se observó su comportamiento por un periodo de tiempo; en el cual se toman las probetas cada una hora y se pesan para así calcular la cantidad de agua que ha absorbido, la última medición se realizó a las 120 horas.

2.12 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON EL SISTEMA ROCAMIX LÍQUIDO

El sistema Rocamix es un sistema de estabilización y de impermeabilización de suelo de alta tecnología del tipo “aditivo de acción química”. “Es una copia fiel de la naturaleza” El sistema logra en muy corto tiempo el endurecimiento y petrificación del suelo; algo que para la naturaleza le tomaba millones de años en realizar”, que se diferencia de los métodos tradicionales porque torna la compactación del suelo en estado **totalmente irreversible**.

¿Qué es el Rocamix?

Es una solución acuosa de compuestos de amonio cuaternario. Composición de monómeros y polímeros de origen orgánico. Formule química: Una mezcla poli molecular sustancias activas interfaciales disolventes, emulador y catálisis CAS 112-03-08 con un contenido determinado de acetato de celulosa CAS 9004-35-7 e hidratos de carbono complejo compuesto de largas cadenas de unidades de glucosa, unidas por enlaces químicos de glicósido y componentes exclusivos Rocamix.

Es un producto semi viscoso formado por la mezcla de monómeros y polímeros con catalizadores, e intercambiadores iónicos y aceleradores de penetración.

¿Cuál es el efecto Rocamix?

La explicación profunda de las reacciones químicas dentro del suelo escapa a esa presentación, sin embargo, se puede decir en líneas generales que la estabilización química con Rocamix consiste en agregar al suelo productos específicamente diseñados para equilibrar los desbalances, mediante la incorporación de fuertes iones más cationes que reemplazan los débiles cationes del agua adheridos a la partícula de arcilla, disociándolos y ocupando los sitios iónicos vacantes. Cómo además las moléculas del estabilizador poseen un "cola" hidrofóbica constituida por ciertos enlaces de átomos de H y C (hidrocarburos), la partícula cambia su comportamiento comenzando a repeler agua manteniendo las partículas de arcilla en un estado

hidrofóbico permanente. Esto por otra parte, implica la eliminación del efecto expansivo que el agua provoca en los suelos ya que una vez que las reacciones químicas se han producido, el agua que ingresa al sistema se comporta en forma libre evaporándose muy rápidamente una vez que las condiciones climáticas lo permitan, por lo que el suelo aumentará su densidad y consolidación considerablemente.

¿Por qué se debe usar rocamix?

– **Ahorro resistencia**

El Sistema Rocamix permite una mejora de los valores de sustentación de cualquier tipo de suelo ligante o débilmente ligante entre **3 y 5 veces**, en un 50% de los casos incluso muy por encima. Se pueden lograr los valores de sustentación deseados **con un 75% hasta un 100% del suelo disponible a pie de obra** y se ahorra la extracción y el transporte a vertederos controlados y la aportación de material comprado. El ahorro es muy importante.

– **Ahorro**

La mejora de las propiedades, así como de los valores de sustentación del suelo es permanente y mejora en tiempo corto el efecto del tráfico. La firmeza y la estabilidad creciente del suelo tratado llevan a una mejor durabilidad y por eso también a **ahorros aún mayores** debido a un menor mantenimiento.

– **Resistencia**

El Sistema Rocamix **trabaja igual con cualquier tipo de suelos**, activa las fuerzas cohesivas propias del suelo y reduce la influencia del agua de forma importante y duradera. El Sistema Rocamix modifica los suelos en sí mismos de forma permanente y puede ser utilizado por eso tanto en el lugar de su aplicación como en un procedimiento de mezcla previa en planta. Una vez añadido al suelo, éste mantiene el efecto del sistema.

– **Resistencia ahorro**

Los valores de sustentación del suelo tratado permiten una función puente de las capas de sustentación notablemente mejores y por eso una reducción sin riesgo de **las capas de rodadura que pueden pasar de 60 mm a 20/25 mm.**

Teniendo en consideración que, con el diseño de la mejora del suelo, se dan nuevas posibilidades de ahorro que en el Mundo entero pueden llegar entre un 20% y un 45% de los costos de construcción convencionales o tradicionales. Y este ahorro se refiere sólo a la construcción en sí y no incluye los ahorros adicionales debidos a una mayor durabilidad.

– **Simplicidad**

Ya que el suelo interviene con el papel de actor principal, **la aplicación del Sistema Rocamix es muy sencilla**; se precisa en casi todos los suelos la misma cantidad de aditivos para conseguir el resultado deseado. Los otros puntos fuertes del Sistema Rocamix son:

Simplicidad en la aplicación que se realiza con el parque de [maquinaria disponible](#)

Resultado asegurado que se conoce de antemano, ya que se han hecho visibles con ensayos previos de [laboratorio](#).

– **Garantía ecológica**

Inocuidad para el medio ambiente certificado por estudios en laboratorio europeo.

2.12.1 Aplicaciones del nuevo sistema Rocamix

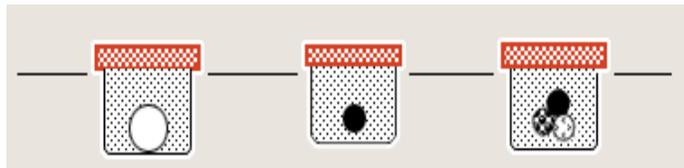
Bases estabilizadoras

- Autopistas
- Carreteras
- Mantenimiento de calles
- Caminos secundarios



Rellenos de redes

- Alcantarillados
- Acueductos
- Redes de distribución



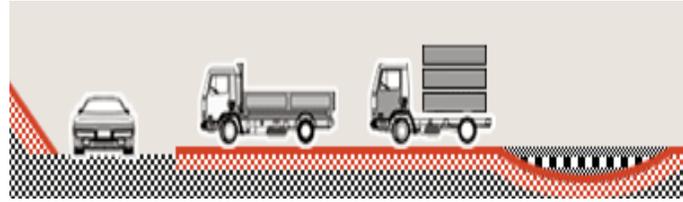
Terraplén ferroviario

- Creación de vías nuevas
- Rehabilitación de vías existentes
- Modificaciones



Explanaciones

- Almacenes a cielo abierto
- Plataformas
- Parquesos
- Taludes



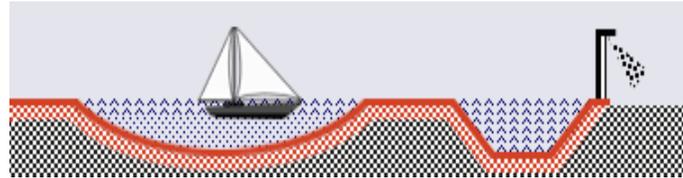
Áreas deportivas

- Áreas deportivas
- Terraplén de campismo
- Áreas de ocio



Impermeabilización

- Presas - Lagos - Acueductos
- Rehabilitaciones
- Embalses para piscicultura
- Otros Embalses



2.12.2 Esquema de la aplicación de la tecnología Rocamix

TRABAJOS PREPARATORIOS

1

LA CLASIFICACIÓN DEL SUELO

- La clasificación del suelo (AASHTO)
- Clasificación certificada por un laboratorio autorizado
- La categorización específica Rocamix y determinación de las dosis de Rocamix concentrado y de cemento.

2

LA TASA DE HUMEDAD DEL SUELO

- El cálculo de la Humedad y de la Humedad óptima del suelo natural del terreno
- Los parámetros del PROCTOR modificado
- Estudios realizados y certificados por un laboratorio autorizado.

3

LA FÓRMULA PARA LA PREPARACIÓN DEL PRODUCTO ROCAMIX

- La preparación de la Fórmula debe contener la cantidad de agua determinada por los parámetros del PROCTOR modificado.

TRABAJOS EN LA OBRA

4

LA APLICACIÓN Y LA MEZCLA DE LOS PRODUCTOS CON EL SUELO

- Los Trabajos específicos asociados a la Tecnología Rocamix, pueden comenzar después de la preparación, escarificación y desbroce del suelo a tratar.
- Debe realizarse un control riguroso al proceso de escarificación.
- Regar Rocamix diluido con el suelo a tratar (líquido).
- Dispensar el Cemento (sólido).
- La mezcla del suelo con el líquido más el sólido.
- Debe efectuarse un control riguroso de la mezcla suelo más productos.

5

LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

- Eventualmente realizar un ligero trabajo de perfil.
- Realizar un control de humedad antes la compactación.
- Realizar la Compactación siguiendo los parámetros establecidos por el proctor modificado.
- Realizar un control de la compactación.

2.12.3 Márgenes requisitos aceptables de los suelos para la aplicación de la tecnología Rocamix

2.12.3.1 Teorema Rocamix

Una vez realizados los ensayos de laboratorio, es necesario comparar inmediatamente con los datos del Teorema Rocamix 10+10+20. Si los resultados son conformes el sistema Rocamix puede ser aplicado y ser de una gran eficacia con el suelo.

Pero, por los suelos que no comportan esas características, conformes al Teorema Rocamix 10+10+20, otros ensayos de laboratorio son necesarios, con ese mismo suelo y dosis más fuerte de Rocamix más aditivos, para determinar las dosis y mezclas exactas a realizar.

Y en los casos extremos, una adición de arcilla en una proporción de 3 hasta 5% será realizada en ese suelo.

Figura 2.7 Abaco de plasticidad



Fuente: Manual de aplicación de Rocamix

El profundo conocimiento del Colegio de Asistencia Técnica Rocamix para el tratamiento de suelos existentes, y los numerosos estudios y pruebas de laboratorio han permitido al Colegio determinar con precisión el campo de aplicación del "efecto Rocamix" en los suelos tratados.

De este modo se ha creado por el colegio de Asistencia Técnica el **Teorema Rocamix 10+10+20**. A partir de estos datos muy básicos del estudio del laboratorio, es posible confirmar que el suelo a tratar será favorable a "los efectos del tratamiento con sistema Rocamix"

Tamaño de las partículas: Pasaje al 200 tamiz (0.075 mm de espacio de la malla).

Un mínimo de 10% del suelo debe pasar a través del tamiz N° 200 y así indica que el suelo contiene suficientes partículas "finos" que son sensibles al agua y desestabilizan el suelo. Son estas partículas "fino" arcillosas que hacen reaccionar los suelos con el producto y en este caso puede estabilizarse con el tratamiento del Sistema Rocamix.

A distinción se hará a través de la determinación del índice de Plasticidad (IP) determinado por los límites de Atterberg.

Cuando **10%** de las partículas pasan a través del tamiz 200, eso facilitara el tratamiento del suelo con Rocamix.

Índice de Plasticidad (IP): *Grado de la plasticidad del suelo determinado por los límites de Atterberg*

- Entre 0 y 5 -> Suelo No plástico
- Entre el 5 y el 12 -> Suelo poco plástico
- Entre 12 y 40 -> Suelo plástico
- Top 40 -> Suelo muy plástico

Un índice de Plasticidad (IP) de al menos **10%** facilitara el tratamiento del suelo.

Límite líquido (LL): *Cantidad % de agua que se necesita para pasar de la fase de plástico a la fase liquida.*

El índice de Plasticidad (IP) es el resultado de la diferencia entre el Límite líquido (LL) y el Límite de plasticidad (LP), (fórmula en la física, $WL = IP - WP$). Por eso el Límite líquido (LL) debe ser un porcentaje alto para permitir que sea mayor el número % del índice de Plasticidad (IP).

Un Límite líquido (LL) de al menos **20 %** permitirá un número % de índice de plasticidad (IP) superior y esto facilitará el tratamiento del suelo.

En resumen, estas observaciones han permitido crear el Teorema Rocamix 10+10+20 que indica que todos los suelos que contienen estas características pueden ser tratados con el Sistema Rocamix.

Para todos los suelos que no tienen estas características, se harán pruebas de laboratorio con Suelo natural más Rocamix más Aditivo para determinar las dosis exactas y mezclas de estos, con el fin de obtener el "efecto Rocamix".

En el caso más extremo, se proporcionará una adición de arcilla de 3 a 5% y se mezclará con el suelo a tratar.

2.12.4 Carta de clasificación AASHTO para el diseño de dosificaciones

TABLA 2.5 Clasificación sistema AASHTO, aplicación sistema Rocamix

Clasificación General	Materiales granulares (35% como mínimo de lo que pasa el tamiz N° 200)							Materiales de arcilla-limo (más de 35% del total de la muestra que pasa el tamiz N° 200)			
Clasificación AASHTO	A-1	A-1-b	A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6	
Clasificación SUCS	GW	GC	SM	SM	SC	SC	SP	ML	MH	CL	OH
Tipos de suelos	Suelos buenos a regulares							Suelos regulares, malos a muy malos			
Clasificación Rocamix	R1	R1	R2	R2	R2	R2	R3	R2	R3	R3	R3
La clasificación del suelo permite determinar la cantidad de Rocamix concentrado y de cemento o cal o la mezcla de ambos por m ³ , las dosis son teóricas y deben ser usadas como guías al inicio de los ensayos de laboratorio											
Litro de producto por m ³	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
Kilogramo de cemento por m ³	10	10	15/20	15/20	15/20	15/20	20/25	15/20	20/25	20/25	20/25

Fuente: Manual de aplicación de Rocamix

2.12.5 Procedimientos e instrumentos para la aplicación de la tecnología Rocamix

2.12.5.1 La clasificación del suelo

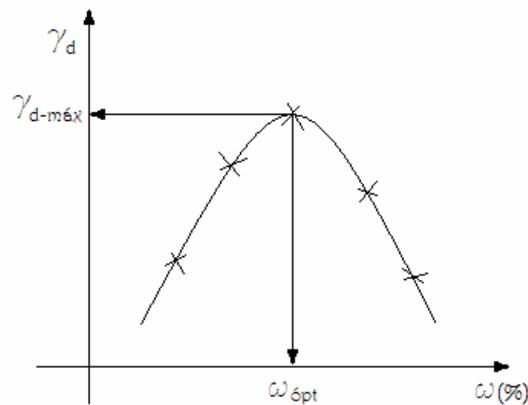
Antes de emplear la tecnología ROCAMIX es esencial determinar la clasificación de los suelos según la metodología AASHTO quien los clasifica y así conseguir una categorización específica ROCAMIX, R1, R2, y R3. Según esa categorización, confirmada por los ensayos de laboratorio, se puede determinar la cantidad de ROCAMIX concentrado y la cantidad de CEMENTO a emplear por M³ de suelo a tratar.

Y en función de los resultados obtenidos el laboratorio debe AJUSTAR o MODIFICAR las dosis de manera a obtener los mejores resultados del Sistema Rocamix en función de los resultados exigidos. La influencia de la poca cantidad de aditivo cemento o cal o mezcla de ambos es muy fuerte su reacción con el producto Rocamix y por eso varios ensayos pueden ser necesarios para usar exactamente la buena dosis.

Debemos recordar que si la clasificación AASHTO tiene 7 grupos y 8 sub-grupos, la composición física de un suelo comporta miles de versiones y cada una puede reaccionar de manera diferente al tratamiento con el Sistema Rocamix.

2.12.5.2 La tasa de humedad del suelo

Figura 2.8 La compactación del suelo



Fuente: Manual de aplicación de Rocamix

¿Cómo trabajar?

Hay que recordar que el suelo utilizado tiene siempre un peso promedio de 1700kg/2200kg por m³, y cada suelo contiene una cantidad de agua (que se corresponde con la humedad óptima) muy variable según los casos.

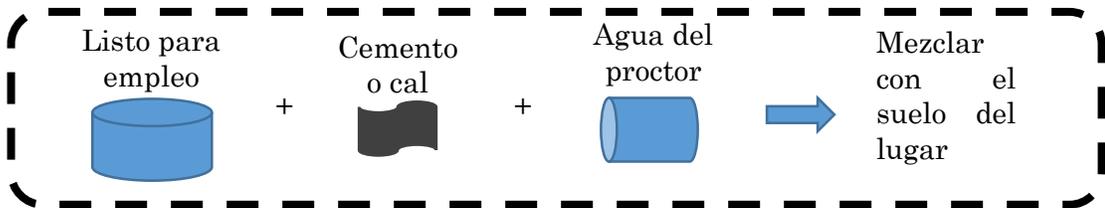
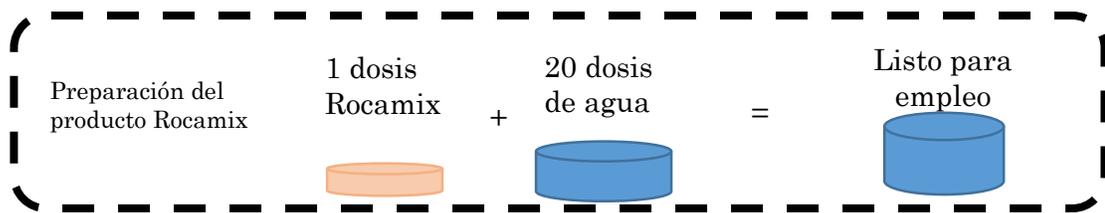
Cabe señalar que el efecto Rocamix se obtiene a través de una muy eficiente compactación del mismo suelo, cuyo grado se define a partir de ensayos de Laboratorio

con los que se determina la Humedad óptima, es el ensayo proctor modificado, pasos necesarios para obtener la mayor densidad máxima.

2.12.5.3 La fórmula para la preparación del producto con el suelo

Es obligatorio que el producto Rocamix diluido listo para ser aplicado en el suelo debe ser mezclado también con el suplemento de agua cuya cantidad está determinada por los parámetros del proctor modificado.

Para asegurar que el producto diluido alcance toda la superficie del terraplén, es obligatorio agregar al suelo una dosis de agua de al menos 1% de su peso, por lo cual equivale a un promedio de 17/22 litros por m³.



2.12.5.4 La compactación del suelo

Es indispensable verificar que el grado de humedad del suelo tratado es conforme a los parámetros establecidos por el PROCTOR modificado. Ese control debe efectuarse “in situ”.

Es aconsejado de utilizar siempre un equipo sencillo para medir la humedad del suelo tratado.

La compactación debe respetar las normas establecidas y debe ser conforme a los resultados del proctor modificado.

El control de la compactación que sirve para verificar la indispensable calidad del trabajo debe ser sistemáticamente realizado con uno de los aparatos de última generación y de manipulación muy sencilla. Los resultados aparecen de inmediato y permiten indicar si la compactación es conforme.

2.12.6 Procedimiento de ensayo realizado en el laboratorio

1



Los ensayos empiezan por la extracción del suelo de la obra a tratar. Sea más o menos 45/50 kg de suelo.

2



El suelo extraído debe ser perfectamente tamizado de manera que las muestras no tengan partículas más grandes que 5 mm.

3



Después, en el laboratorio, con este suelo tamizado y seco, pesar 6 proporciones de XXX gramos para realizar 6 muestras.

4



Preparar las 6 muestras de la manera siguiente:

Realizar 2 muestras sin ningún aditivo, muestras llamadas cero (0). Realizar las 2 muestras (llamadas R) con la adición de las dosis previstas según la clasificación del suelo Rocamix R1, R2 o R3. Realizar las 2 muestras (llamadas RM) con la adición de la cantidad máxima de Rocamix concentrado 0.60 l/m³ y de cemento o cal o la mezcla de ambos 25 kg/m³.

5



Las 6 muestras, puestas en los moldes, pueden ser comprimidas (50 kg/cm²) con una prensa hidráulica (equipamiento como en la foto).

2.12.7 Empleo del producto mezcla y dosis

PRODUCTO LÍQUIDO ROCAMIX	DOSIS
Suelos clasificados R1	0,40 L de producto concentrado por m ³ de tierra del lugar
Suelos clasificados R2	0,50 L de producto concentrado por m ³ de tierra del lugar
Suelos clasificados R3	0,60 L de producto concentrado por m ³ de tierra del lugar

PRODUCTO SOLIDO CEMENTO

DOSIS

Según la clasificación propia y exclusiva de Rocamix (llamadas R1, R2, R3), un aditivo solido de cemento debe agregarse al producto liquido Rocamix.

Suelos clasificados R1	10 kg de cemento por m ³ de tierra del lugar
Suelos clasificados R2	15/20 kg de cemento por m ³ de tierra del lugar
Suelos clasificados R3	20/25 de cemento por m ³ de tierra del lugar

2.12.8 Aplicación de los productos Rocamix equipos necesarios

NIVELACIÓN - PREPARACIÓN- ESCARIFICACIÓN

Con moto niveladora + scrapers de atrás o tractor + grada/disco



DISTRIBUIDOR DEL LÍQUIDO MAS AGUA

Con camión cisterna o tractor +cisterna + barra distribuidora



REPARTIR EL CEMENTO o CAL o MEZCLA DE AMBOS

Con camión volquete o mini cargador o maquina distribuidora



MEZCLA DE ROCAMIX + ADITIVO CON EL MISMO SUELO

Con moto niveladora o tractor grada/disco



NIVELACIÓN

Con moto niveladora



COMPACTACIÓN

Con compactador-vibrador de al menos 7 toneladas



CAPÍTULO III

3 RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo analizaremos las características físico mecánicas (granulometría, plasticidad, densidad, CBR) de los distintos tipos de suelos en su estado natural evaluaremos sus valores de granulometría plasticidad, capacidad de soporte que tienen, luego de obtener los resultados, analizarlos y elevar un comentario, concluyendo si los suelos en su estado natural son aceptables o necesitan ser mejorados para que cumplan con especificaciones mínimas para ser utilizado en alguna obra de ingeniería. De esta manera se presentan y se discuten los resultados arrojados en un estudio convencional de las propiedades físico-mecánicas fundamentales y necesarias para llevar a cabo el análisis comparativo entre un suelo en estado natural y luego de ser estabilizado con el nuevo sistema Rocamix líquido más cemento portland.

Se ubicaran distintos puntos en la ciudad para el levantamiento de muestras, se extraerán la cantidad de muestra necesaria para realizar los ensayos, se seleccionara un barrio para realizar la aplicación de la investigación y como referencia se elegirá dos muestras de otros barrios para que el estudio abarque en una variabilidad de tipos de suelos del medio local, esta selección de muestras también se verá afectada bajo las exigencias de la empresa Rocamix, respecto al teorema Rocamix 10+10+20, explicada en el capítulo II.

Se verificará las características de resistencias de los suelos, comparando con lo que establece lo normativa local de la ABC, respecto al uso en subrasante.

Las muestras seleccionadas deberán cumplir con especificaciones mínimas en rangos para aplicar el proceso, en cuanto al % que pase el tamiz N° 200, al índice de plasticidad, y al límite líquido, estos aspectos facilitarán el tratamiento entre el suelo y el aditivo.

El motivo para realizar este estudio nace de la inquietud personal por encontrar una solución que satisfaga las exigencias que requieren las obras de ingeniería en cuanto a

resistencia de los suelos, es decir la solución más óptima para los problemas y daños que padecen las fundaciones de una obra vial de las zonas periurbanas de la ciudad de Tarija especialmente en épocas de lluvia.

3.2 SELECCIÓN DE SUELOS

3.2.1 Inspección visual del sitio de levantamiento de muestras

Antes de la extracción de las muestras de suelos se procedió a una inspección visual de la zona urbana de Tarija recorriendo los barrios en las afueras de la ciudad donde se puede encontrar una gran variedad de suelos, que comportan varias versiones aun tratándose de una misma clasificación.

La visita antes mencionada tiene la finalidad de localizar los sitios probables de donde serán extraídas las muestras, sin embargo en estos puntos de levantamiento los tipos de suelos deben tener ciertas características como el de carácter fino debido a la delimitación del tema que es trabajar con estos tipos de suelos, que son los que más deficiencias presentan en cuanto a resistencia como para ser utilizado en alguna obra de ingeniería.

3.3 EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

3.3.1 Suelos estudiados

Para la obtención de las muestras, los puntos de levantamiento fueron seleccionados de manera aleatoria, en cualquier zona de la ciudad de Tarija el propósito es encontrar una variedad de suelos arcillosos y limosos, esto para analizar la aplicabilidad del nuevo sistema Rocamix líquido, y aplicándole distintos porcentajes de aditivo Rocamix más cemento portland, para después analizar cómo responden estos suelos ante una estabilización de este tipo, se analizaran varias muestras con el propósito que sean representativas del lugar de aplicación como referencia, pero la aplicación se realizara en el barrio torrecillas.

Recordar que las muestras que vayan a ser seleccionadas para aplicar todo el proceso de estabilización también deben cumplir con las exigencias o especificaciones que recomienda la empresa Rocamix, respecto al teorema Rocamix “10+10+20”

3.4 UBICACIÓN DE LA ZONA MUESTREO

Para poder realizar un muestreo se parte de ubicar los puntos de donde seran extraidas las muestras, estos puntos se eligieron de manera aleatoria distribuidos en los distintos barrios de la ciudad de Tarija, mas especificamente en barrios periurbanos, se realizo esto con la premisa de poder encontrar una variabilidad de suelos con lo que se cuenta en el medio local, pero sobre todo que sean suelos del carácter fino como lo son las arcillas y los limos con distintos grados de plasticidad, para luego realizar una caracterizacion en su estado natural en el laboratorio y determinar las dosis que se le asignaran a los distintos tipos de suelos.

A continuacion se identificaran todos los barrios de los cuales se realizo el levantamiento de muestra, describiendo cada uno de ellos con su respectiva ubicación que tienen en la macha urbana de la ciudad de Tarija.

El barrio Constructor limita al oeste con los barrios Andaluz y San Bernardo, al este con el barrio Luis Espinal, al norte con el barrio Santa Rosa, y al sur con el barrio Pedro Antonio Flores.

El barrio San Jorge II limita al este con el barrio Torrecillas, al oeste con el barrio San Jorge I, al norte con el barrio Simon Bolivar, y al sur con el rio Guadalquivir.

El barrio Torrecillas se encuentra en la parte sur de la ciudad de Tarija, siendo un barrio periurbano el cual se encuentra en proceso de consolidacion.

El barrio San Geronimo limita al norte con el barrio Juan XXIII, al sur con el rio Guadalquivir, al este con el Aeropuerto, y al oeste con el barrio el Tejar.

El barrio Petrolero limita al este con el barrio San Luis, al oeste con el barrio San Geronimo, al norte con el Aeropuerto, y al sur con el rio Guadalquivir.

San Blas limita al norte con el barrio Miraflores, al sur con San Jacinto norte, al este con el rio Guadalquivir, y al oeste con Tablada Grande.

El barrio Pascuas limita al norte con el barrio 101 Familias, al sur con el barrio Maria de los Angeles, al este con el barrio 3 de Mayo, y al oeste con el barrio Los Chapacos.

El barrio IV Centenario limita al este con el barrio 12 de Octubre al oeste con el barrio Defensores del Chaco, al norte con el barrio 3 de Mayo, y al sur con el barrio La Loma.

El barrio Maria de los Angeles limita al este con el barrio 3 de Mayo, al oeste con el barrio Los Chapacos, al norte con el barrio las Pascuas, y al sur con el barrio Defensores del Chaco.

El barrio Defensores del Chaco limita al oeste con el Parque Urbano, al este con el barrio IV Centenario, al norte con el barrio Maria de los Angeles, y al sur con los barrios Luis Pizarro y 57 viviendas.

El barrio San Antonio limita al norte con el barrio Aranjuez, al sur con Tabladita I, al este con el barrio Méndez Arcos, y al oeste con Tabladita II.

El barrio Tablada II limita al este con el barrio San Antonio, al oeste con el barrio Alto Senac, al norte con el barrio Amalia Medinaceli, y al sur con el distrito 13.

El barrio Miraflores limita al este con el rio Guadalquivir, al oeste con la carretera a San Jacinto, al norte con el barrio German Busch, y al sur con San Blas.

El barrio Lourdes limita al norte con el barrio 24 de Junio, al sur con el barrio Florida, al este con la quebrada el Monte y al oeste con el barrio 3 de Mayo.

El barrio Andaluz limita al este con el barrio Constructor, al oeste con la quebrada el Monte, al norte con el barrio 1 de Mayo y al sur con el barrio San Bernardo.

El barrio Morros Blancos limita al norte con el barrio Artesanal, al sur con el barrio Simón Bolívar, y al oeste con el barrio Aeropuerto.

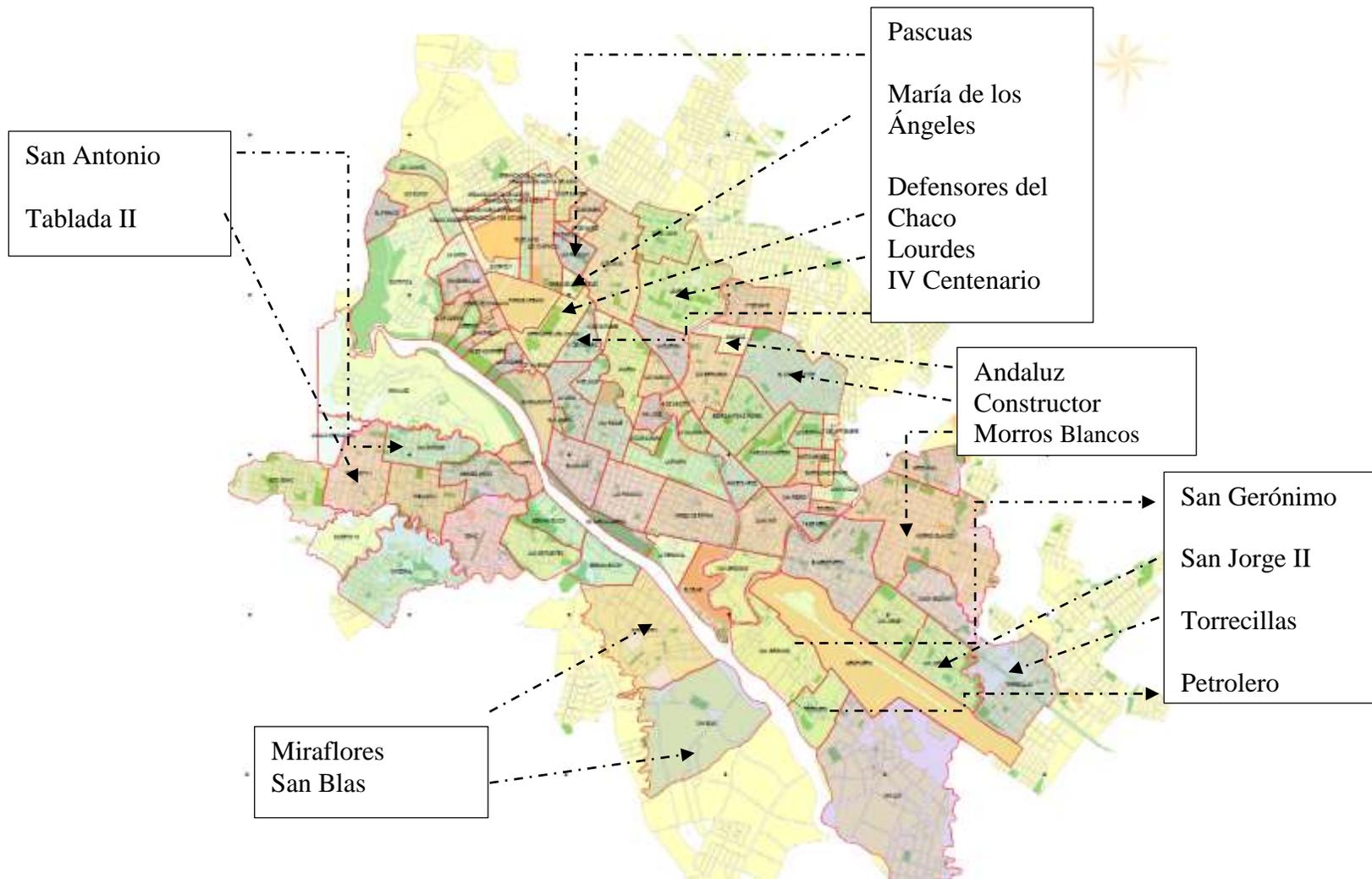
TABLA 3.1 Barrios en los que se levantó muestra

Nº	Barrios	Muestra
1	Constructor	Muestra 1
2	San Jorge II	Muestra 2
3	Torrecillas	Muestra 3

4	San Gerónimo	Muestra 4
5	San Gerónimo	Muestra 5
6	Petrolero	Muestra 6
7	San Blas	Muestra 7
8	Las Pascuas	Muestra 8
9	IV Centenario	Muestra 9
10	María de los Ángeles	Muestra 10
11	Defensores del Chaco	Muestra 11
12	Torrecillas	Muestra 12
13	Torrecillas	Muestra 13
14	Torrecillas	Muestra 14
15	Torrecillas	Muestra 15
16	San Antonio	Muestra 16
17	Tablada II	Muestra 17
18	Miraflores	Muestra 18
19	Lourdes	Muestra 19
20	Andaluz	Muestra 20
21	Morros Blancos	Muestra 21
22	Morros Blancos	Muestra 22

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.1 Barrios en lo que se levanto muestra



Fuente: Unidad de catastro de Tarija

3.5 REALIZACIÓN DEL MUESTREO

Para el análisis del suelo el muestreo se realiza a través de cortes o perforaciones, llegando a obtener muestras que son representativas para los fines que tiene la investigación. Con la profundidad a la que se hicieron los cortes que fueron de 60 cm, para extraer muestras inalteradas que no contengan algún resto de material como basura o vegetación, lo cual se hizo con herramientas comunes como ser picota y pala. En tal sentido se constató a través de las excavaciones que se realizó que el terreno es el apropiado para la extracción de las muestras a dicha profundidad por tratarse del suelo que se buscaba tratándose de. Con el fin de obtener varias muestras que nos representen una variabilidad de los suelos que tenemos en el medio local se levantaron 22 muestras de distintos puntos de la ciudad de Tarija, para que de esa manera se estudiaran en el laboratorio. La cantidad de muestra extraída en cada uno de los puntos está en función de la cantidad de ensayos extrayendo una cantidad aproximada de 10 kg por cada punto inicialmente, porque luego de las muestras seleccionadas para la aplicación se extraerán una cantidad mucho mayor aproximadamente 250 kg. Las muestras extraídas fueron colocadas en bolsas de nylon para conservar la humedad natural hasta el laboratorio de la universidad.

3.6 MATERIAL DE APORTE (ESTABILIZANTE)

Figura 3.2 Producto rocamix



Fuente: Elaboración propia

3.7 CARACTERIZACIÓN EN CONDICIONES NATURALES DEL SUELO

Todas las muestras de suelo que fueron extraídas de los distintos puntos son transportadas hasta el laboratorio de suelos y hormigones de la universidad, donde fueron analizadas cada una de sus propiedades para realizar la clasificación, con el propósito de determinar algunas características físicas-mecánicas (granulometría, plasticidad, densidad, CBR) del suelo. Los detalles de los ensayos y la metodología utilizada fueron del manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC, que se encuentran en el capítulo II con todos sus procedimientos, tablas, ábacos, rangos, ecuaciones ajustándose el procedimiento a lo establecido en las especificaciones de la norma ASTM para el estudio de suelos.

3.7.1 Propiedades físicas y mecánicas de los suelos estudiados

Para obtener las características del suelo se realizaron los ensayos correspondientes a granulometría, plasticidad, peso específico, compactación, relación soporte de california (CBR) y ascensión capilar cuyos resultados se mostrarán a continuación.

3.7.2 Determinación en laboratorio del contenido de agua (Humedad) de suelos (DESIGNACIÓN ASTM D2216)

Se determinó la humedad inicial o natural utilizando la ecuación 2.1 descrita en el capítulo 2 y apoyada en el manual de ensayos de suelos de la ABC, dando como resultado la siguiente tabla.

TABLA 3.2 Resultados del contenido de humedad suelo natural

Nº de Muestra	Contenido de humedad (%)
1	4.78
2	6.70
3	7.36
4	6.43
5	5.41
6	8.77
7	3.56
8	1.53
9	2.42
10	4.48
11	2.81
12	11.53
13	5.73
14	7.10
15	9.88
16	10.99
17	8.24

18	9.96
19	7.40
20	5.35
21	4.26
22	3.97

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Si bien el contenido de humedad natural o inicial es una propiedad que depende de muchos factores externos como las condiciones atmosféricas y del lugar de extracción de la muestra ya que pueden existir zonas donde la lluvia puede formar grandes charcos o zonas en que la temperatura sea elevada provocando una rápida evaporación del agua, no es siempre la misma debida a las consideraciones anteriores.

3.7.3 Ensayo de granulometría

Para la realización de la granulometría de los suelos analizados se realizó el procedimiento desarrollado en el capítulo II contenido en el manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC, usando el método del lavado por tratarse de suelos finos,

además se realizó el método del hidrómetro. Dando como resultado las siguientes tablas y gráficos de las curvas granulométricas generadas.

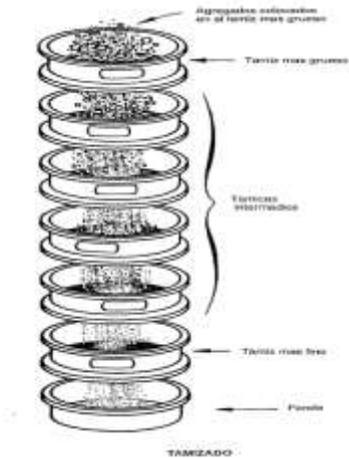
3.7.3.1 Análisis granulométrico por tamizado (DESIGNACIÓN ASTM D-422 AASHTO T-88)

Figura 3.3 Juego de tamices



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.4 Tamizado de la muestra



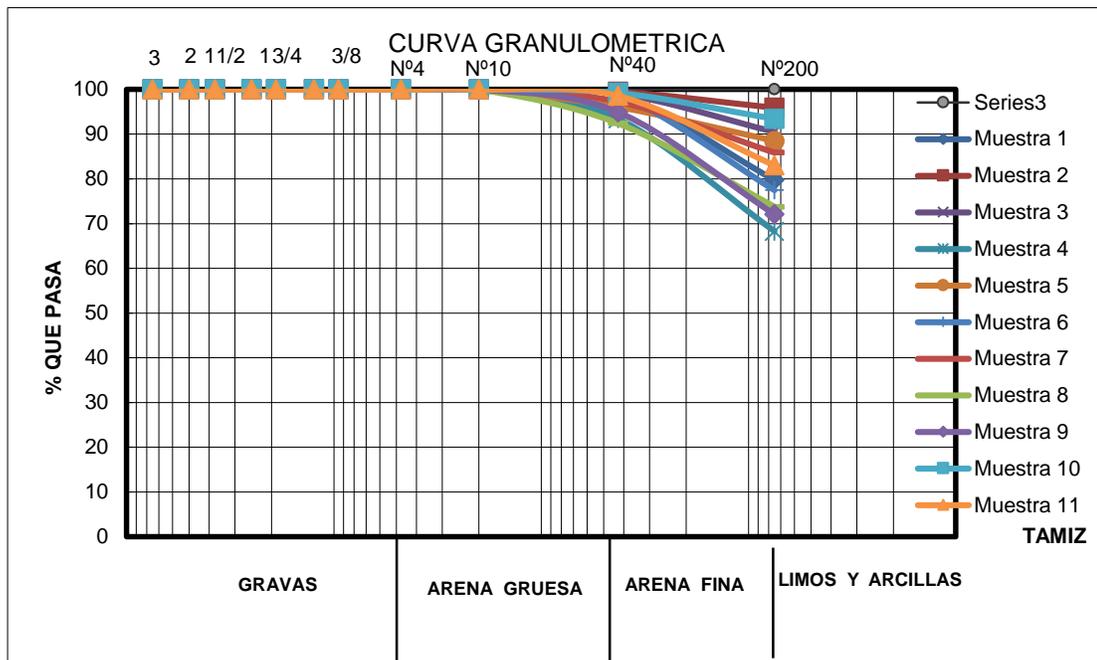
Fuente: Braja M. Das

TABLA 3.3 Resultados de la granulometría del suelo

Análisis granulométrico												
Tamices	Tamaño	% Que Pasa del total										
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7	Muestra 8	Muestra 9	Muestra 10	Muestra 11
3"	75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	37.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nº4	4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nº10	2.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nº40	0.425	98.87	99.49	99.11	93.40	96.04	98.53	97.27	92.40	94.87	99.22	98.58
Nº200	0.075	79.77	95.89	90.51	68.27	88.47	77.46	85.87	73.74	72.07	93.40	83.05
Tamices	Tamaño	Muestra 12	Muestra 13	Muestra 14	Muestra 15	Muestra 16	Muestra 17	Muestra 18	Muestra 19	Muestra 20	Muestra 21	Muestra 22
3"	75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2"	50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1 1/2"	37.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1"	25.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nº4	4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nº10	2.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Nº40	0.425	95.89	98.41	97.55	97.37	95.48	89.61	94.70	96.01	92.93	98.34	98.14
Nº200	0.075	89.56	92.07	92.23	89.37	86.10	74.83	83.98	85.08	76.43	90.94	91.10

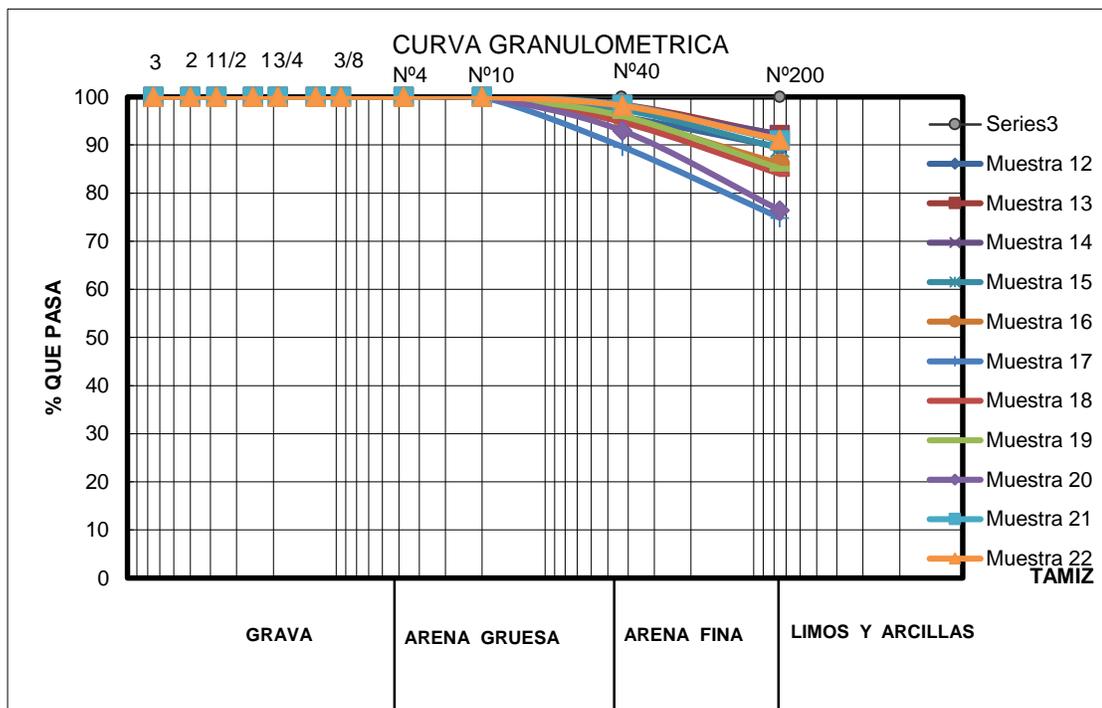
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5 curva granulométrica del suelo natural (Muestra 1-11)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 Curva granulométrica del suelo natural (Muestra 12-22)



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Realizando un análisis de las curvas granulométricas de las veintidós muestras se puede apreciar que en todos los casos los porcentajes que pasan el tamiz N° 200 (0.075 mm de diámetro) es más del 35%, correspondiente a un material fino compuesto por limos y arcillas, como se trata de un alto porcentaje que pasa el tamiz N° 200 se debe realizar el método del hidrómetro para encontrar la distribución granulométrica a partir de dicho tamiz.

3.7.4 Determinación de los límites de consistencia líquido y plástico (DESIGNACIÓN ASTM D4318 AASHTO T-89 T-90)

Para la determinación del límite líquido se utilizó la ecuación 2.7, y para la determinación del límite plástico la ecuación 2.8 como así también en la determinación del índice de plasticidad la ecuación 2.9 ecuaciones que se encuentran desarrolladas en el capítulo II de este estudio.

Figura 3.7 Ensayo límite líquido



Figura 3.8 Ensayo límite plástico



Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.4 Resultados de plasticidad suelo natural

N° de muestra	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice plasticidad
Muestra 1	33.91	20.20	13.70
Muestra 2	55.30	24.46	30.84
Muestra 3	26.85	16.35	10.50
Muestra 4	27.86	18.21	9.66
Muestra 5	45.37	26.17	19.20
Muestra 6	29.34	16.20	13.13
Muestra 7	52.23	26.11	26.12
Muestra 8	25.01	16.49	8.52
Muestra 9	24.05	19.32	4.73
Muestra 10	44.75	27.71	17.04
Muestra 11	37.14	19.49	17.65
Muestra 12	46.65	30.17	16.47
Muestra 13	46.77	36.09	10.68
Muestra 14	38.18	21.49	16.68
Muestra 15	39.42	22.97	16.45
Muestra 16	45.03	31.98	13.06
Muestra 17	33.88	26.27	7.61
Muestra 18	36.81	24.14	12.67
Muestra 19	30.48	19.20	11.28
Muestra 20	26.17	16.61	9.56
Muestra 21	50.73	23.78	26.95
Muestra 22	37.01	22.43	14.58

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

De los resultados arrojados por el ensayo se puede analizar que se tiene suelos con una amplia variabilidad en su plasticidad, desde suelos poco plásticos, suelos plásticos hasta suelos muy plásticos. De las muestras analizadas tenemos índices de plasticidad mayor o igual al mínimo que indica la AASHTO que es de 11 siendo este el límite para arcillas, de igual manera se observa IP menores de 10 siendo este el límite para suelos limosos como indica la AASHTO.

3.7.5 Ensayo de clasificación de suelos

3.7.5.1 Sistema de clasificación AASHTO (DESIGNACIÓN ASTM D3282 AASHTO M-145)

Para la clasificación de los tipos de suelos se siguió la metodología descrita en el capítulo II, correspondiente al ensayo de clasificación AASHTO que es la que recomienda la empresa Rocamix para clasificar y comparar con su propia clasificación llamadas R1, R2, Y R3.

Para la clasificación se usó la tabla 2.4 tabla para la clasificación AASHTO expuesta en el capítulo II.

TABLA 3.5 Clasificación de suelos

Suelo natural	Porcentaje que pasa por el tamiz			Límite Líquido (LL)	Índice de Plasticidad (IP)	Índice de Grupo (IG)
	No. 10	No. 40	No. 200			
Muestra 1	100.00	98.87	79.77	33.91	13.70	10.00
Muestra 2	100.00	99.49	95.89	55.30	30.84	19.00
Muestra 3	100.00	99.11	90.51	26.85	10.50	8.00
Muestra 4	100.00	93.40	68.27	27.86	9.66	7.00
Muestra 5	100.00	96.04	88.47	45.37	19.20	13.00
Muestra 6	100.00	98.53	77.46	29.34	13.13	9.00
Muestra 7	100.00	97.27	85.87	52.23	26.12	17.00
Muestra 8	100.00	92.40	73.74	25.01	8.52	8.00
Muestra 9	100.00	94.87	72.07	24.05	4.73	7.00
Muestra 10	100.00	99.22	93.40	44.75	17.04	12.00
Muestra 11	100.00	98.58	83.05	37.14	17.65	11.00
Muestra 12	100.00	95.89	89.56	46.65	16.47	12.00
Muestra 13	100.00	98.41	92.07	46.77	10.68	10.00
Muestra 14	100.00	97.55	92.23	38.18	16.68	11.00
Muestra 15	100.00	97.37	89.37	39.42	16.45	10.00
Muestra 16	100.00	95.48	86.10	45.03	13.06	10.00
Muestra 17	100.00	89.61	74.83	33.88	7.61	8.00
Muestra 18	100.00	94.70	83.98	36.81	12.67	9.00
Muestra 19	100.00	96.01	85.08	30.48	11.28	8.00
Muestra 20	100.00	92.93	76.43	26.17	9.56	8.00
Muestra 21	100.00	98.34	90.94	50.73	26.95	17.00
Muestra 22	100.00	98.14	91.10	37.01	14.58	10.00

Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.6 Resultados de la clasificación de suelos

Suelo natural	Clasificación AASHTO	Nombre del suelo
Muestra 1	A-6(10)	suelo arcilloso
Muestra 2	A-7-6(19)	suelo arcilloso
Muestra 3	A-6(8)	suelo arcilloso
Muestra 4	A-4(7)	suelo limoso
Muestra 5	A-7-6(13)	suelo arcilloso
Muestra 6	A-6(9)	suelo arcilloso
Muestra 7	A-7-6(17)	suelo arcilloso
Muestra 8	A-4(8)	suelo limoso
Muestra 9	A-4(7)	suelo limoso
Muestra 10	A-7-6(12)	suelo arcilloso
Muestra 11	A-6(11)	suelo arcilloso
Muestra 12	A-7-5(12)	suelo arcilloso
Muestra 13	A-7-5(10)	suelo arcilloso
Muestra 14	A-6(11)	suelo arcilloso
Muestra 15	A-6(10)	suelo arcilloso
Muestra 16	A-7-5(10)	suelo arcilloso
Muestra 17	A-4(8)	suelo limoso
Muestra 18	A-6(9)	suelo arcilloso
Muestra 19	A-6(8)	suelo arcilloso
Muestra 20	A-4(8)	suelo limoso
Muestra 21	A-7-6(17)	suelo arcilloso
Muestra 22	A-6(10)	suelo arcilloso

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Analizando los resultados obtenidos de clasificación se puede llegar a la conclusión que según AASHTO que todas las muestras pertenecen a la familia de finos por el % que pasa en el tamiz N° 200 (0.075 mm) que es superior al 35% como lo establece. En todas las muestras analizadas se puede concluir que tenemos una variedad en suelos finos, desde limosos hasta arcillas con un alto valor de plasticidad.

A continuación, se hará una sub clasificación por tipo de suelo de acuerdo a la AASHTO, para tener una mejor perspectiva de los tipos de suelos que disponemos para la investigación.

TABLA 3.7 Clasificación de muestras del suelo A-4

Suelo natural	Clasificación AASHTO	Nombre del suelo	Índice plasticidad
Muestra 4	A-4(7)	suelo limoso	10
Muestra 8	A-4(8)	suelo limoso	9
Muestra 9	A-4(7)	suelo limoso	5
Muestra 17	A-4(8)	suelo limoso	8
Muestra 20	A-4(8)	suelo limoso	10

Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.8 Clasificación de muestras del suelo A-6

Suelo natural	Clasificación AASHTO	Nombre del suelo	Índice plasticidad
Muestra 1	A-6(10)	suelo arcilloso	14
Muestra 3	A-6(8)	suelo arcilloso	11
Muestra 6	A-6(9)	suelo arcilloso	13
Muestra 11	A-6(11)	suelo arcilloso	18
Muestra 14	A-6(11)	suelo arcilloso	17
Muestra 15	A-6(10)	suelo arcilloso	16
Muestra 18	A-6(9)	suelo arcilloso	13
Muestra 19	A-6(8)	suelo arcilloso	11
Muestra 22	A-6(10)	suelo arcilloso	15

Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.9 Clasificación de muestras del suelo A-7

Suelo natural	Clasificación AASHTO	Nombre del suelo	Índice plasticidad
Muestra 2	A-7-6(19)	suelo arcilloso	31
Muestra 5	A-7-6(13)	suelo arcilloso	19
Muestra 7	A-7-6(17)	suelo arcilloso	26
Muestra 10	A-7-6(12)	suelo arcilloso	17
Muestra 12	A-7-5(12)	suelo arcilloso	16
Muestra 13	A-7-5(10)	suelo arcilloso	11
Muestra 16	A-7-5(10)	suelo arcilloso	13
Muestra 21	A-7-6(17)	suelo arcilloso	27

Fuente: Elaboración propia

3.8 SUELOS SELECCIONADOS PARA APLICAR LA ESTABILIZACIÓN CON ROCAMIX

Para la aplicación de la presente investigación se seleccionó un barrio de la ciudad de Tarija, para aplicarle el proceso de estabilización a las muestras extraídas del barrio con el nuevo sistema Rocamix líquido más cemento portland. Las muestras seleccionadas deben cumplir ciertas especificaciones impuestas por la empresa Rocamix para aplicarles el proceso de estabilización, tomando cuenta el teorema Rocamix, que indica que el valor mínimo que deba tener el suelo es de 10 en el índice de plasticidad, con la finalidad de asegurarse una correcta aplicación y alcanzar los resultados esperados.

Como referencia se seleccionarán dos muestras que no pertenezcan al barrio de aplicación, será como complementación de la investigación en suelos de otras clasificaciones, teniendo en cuenta que en esta situación las muestras deban cumplir con el teorema Rocamix 10+10+20.

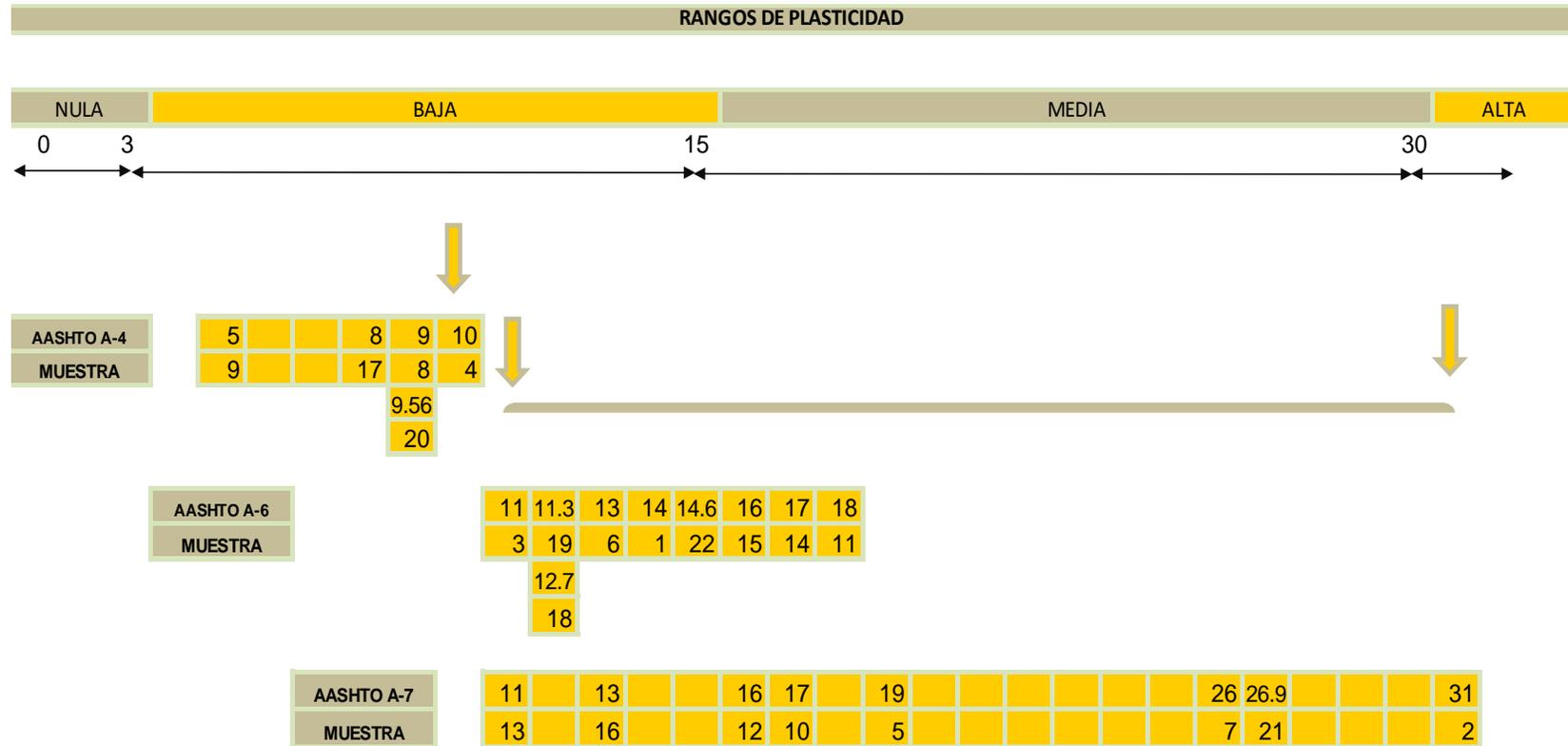
Con estos aspectos y tomando en cuenta la siguiente tabla de rangos de plasticidad en limos y arcillas se seleccionarán las muestras más adecuadas.

TABLA 3.10 Rangos de plasticidad para limos y arcillas

Plasticidad	Descripción del suelo	Rango IP
Nula	Limo	0 - 3
Baja	Limo con trazas de arcilla	4 - 15
Media	Limo arcilloso Arcilla limosa Arcillas y limos orgánicos	16 - 30
Alta	Arcilla limosa Arcilla	> 31

Fuente: (en *Soil Mechanics Basic Concepts and Engineering Application*. Aysen, A. 2002).

TABLA 3.11 Análisis de plasticidad en arcillas y limos



De acuerdo con lo planteado anteriormente con la tabla 3.10 rangos de plasticidad para limos y arcillas y la tabla 3.11 se tomaron la decisión de trabajar con los suelos siguientes:

Se seleccionó el barrio Torrecillas para aplicar la investigación, se levantaron 5 muestras, se trabajarán con todas estas para aplicarles el proceso de estabilización que se tiene previsto en este trabajo.

Como complementación a la investigación se seleccionó un suelo de la clasificación A-4 (suelos limosos), se seleccionó la muestra 4, con un índice de plasticidad de 10, esta muestra fue levantada del barrio San Jerónimo, porque posee el mayor valor respecto al índice de plasticidad y además es el único que cumple con las exigencias de la empresa Rocamix en función del teorema Rocamix.

También como referencia para aplicar la investigación se seleccionó un suelo de la clasificación A-7(AASHTO), correspondiente a arcillas se seleccionó aquella que contenga el valor más alto de IP de nuestras muestras, esta muestra corresponde a la 2, extraída en el barrio San Jorge II, tomando en cuenta que cumpla con las exigencias del teorema Rocamix.

3.8.1.1 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro (DESIGNACIÓN ASTM D-422)

Figura 3.9 Ensayo del hidrómetro



Figura 3.10 Hidrómetro



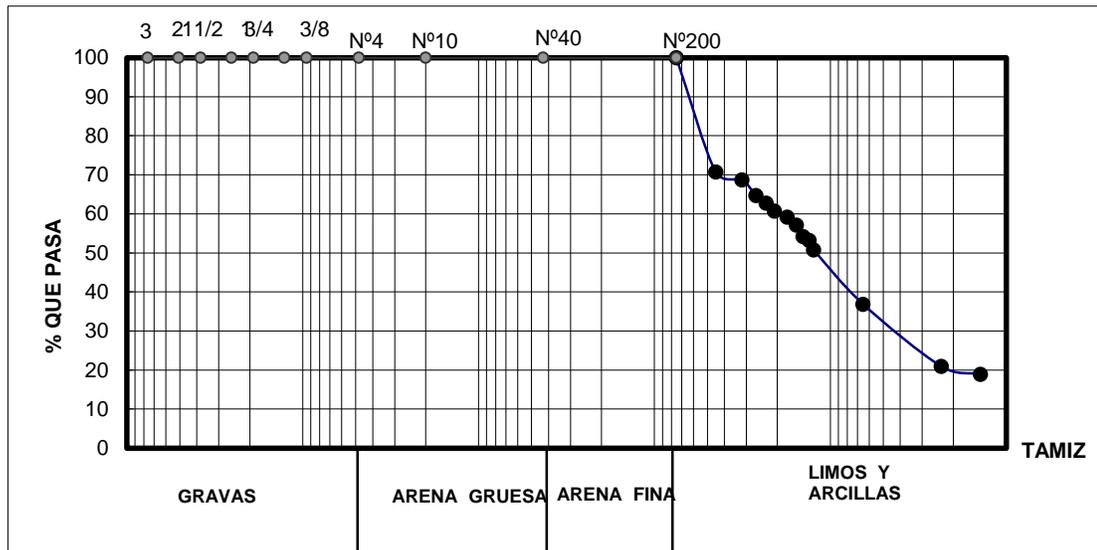
Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.12 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro de los suelos

Suelo A-6		Suelo A-4		Suelo A-7-6	
Diámetro de partículas mm	% de fino	Diámetro de partículas mm	% de fino	Diámetro de partículas mm	% de fino
0.075	100.000	0.075	100.000	0.075	100.000
0.045	70.716	0.049	41.916	0.044	78.924
0.032	68.724	0.035	39.920	0.032	72.960
0.026	64.740	0.029	35.928	0.026	66.996
0.023	62.748	0.025	33.932	0.023	63.020
0.021	60.756	0.023	31.936	0.021	61.628
0.018	59.162	0.019	29.940	0.018	55.664
0.016	57.170	0.017	27.944	0.016	49.700
0.014	54.182	0.015	25.948	0.015	43.736
0.013	53.186	0.014	26.347	0.014	39.760
0.012	50.796	0.013	24.351	0.013	33.200
0.007	36.852	0.007	23.353	0.007	31.212
0.002	20.916	0.002	12.375	0.002	17.296
0.001	18.924	0.001	4.391	0.001	13.320

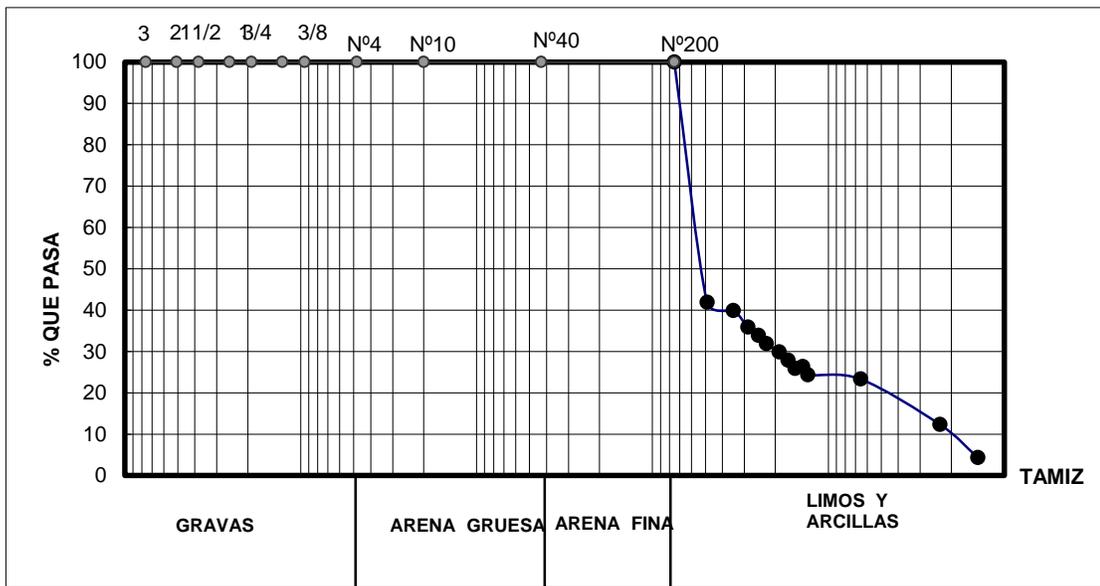
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 Curva granulométrica método del hidrómetro suelo A-6



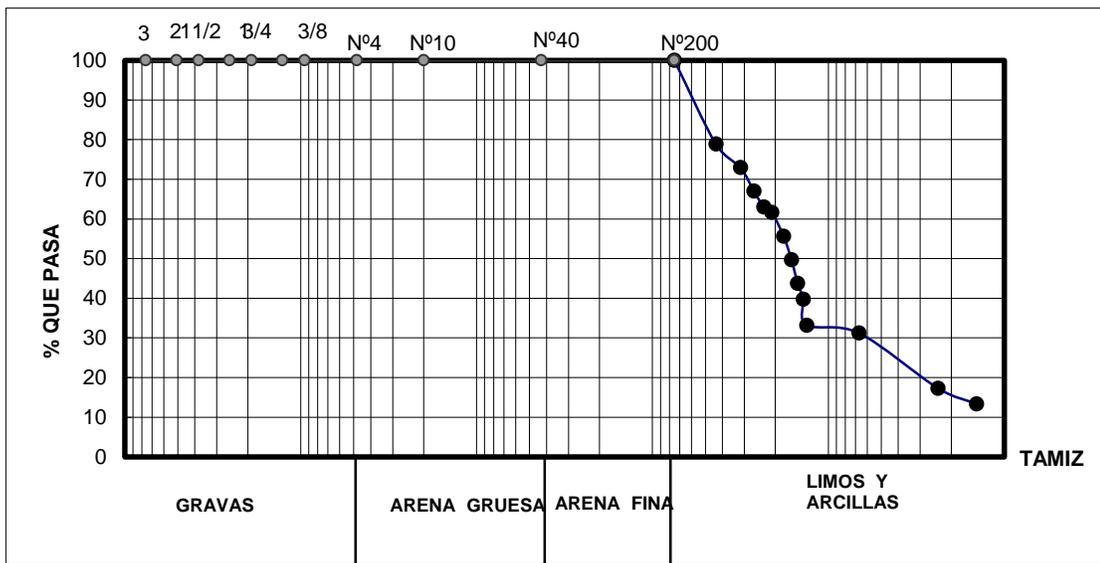
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12 Curva granulométrica método del hidrómetro suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13 Curva granulométrica método del hidrómetro suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

3.8.2 Determinación del peso específico de los suelos (DESIGNACIÓN ASTM D854 AASHTO T-100)

Figura 3.14 Saturación de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Muestra en baño maría



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Muestra secada en el horno



TABLA 3 *Fuente: Elaboración propia* específico

Muestra	Peso específico (Gs)
Suelo A-6	2.67

Suelo A-4	2.65
Suelo A-7-6	2.68

Fuente: Elaboración propia

3.8.3 Ensayo de compactación de suelos

3.8.3.1 Relaciones de peso unitario-humedad en suelos Método estándar (DESIGNACIÓN ASTM D689 AASHTO T-99)

3.8.3.2 Relaciones de peso unitario – Humedad en los suelos Método modificado (DESIGNACIÓN ASTM D422 AASHTO T-180)

Para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima en laboratorio se realizó mediante la compactación estándar y modificado, las características de ambos ensayos fueron descritas en el capítulo II, los datos y cálculos se tabularon en planillas Excel y se utilizaron las ecuaciones siguientes:

- Determinación de la densidad húmeda. 2.11
- Determinación de la densidad seca. 2.12

Figura 3.17 Molde y martillo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.18 Compactación del suelo

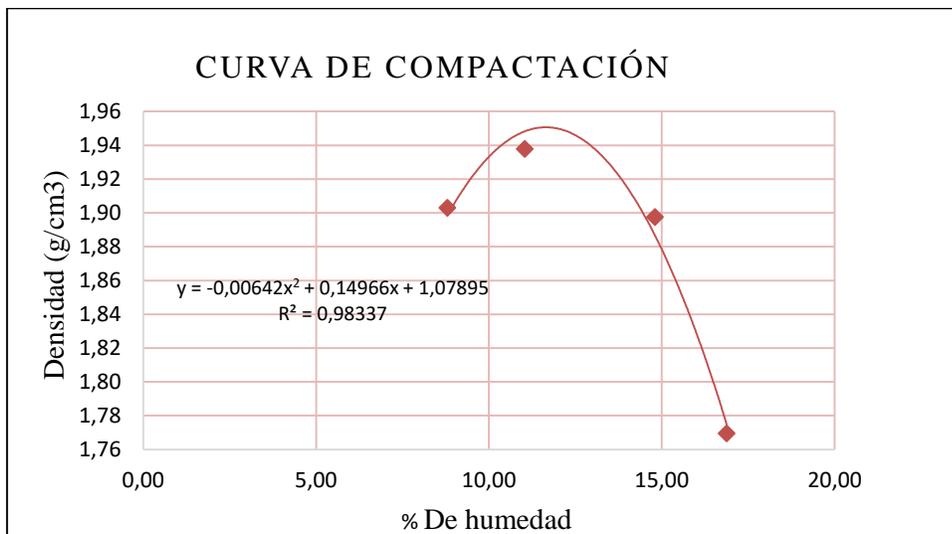


Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.14 Resultados de la compactación proctor

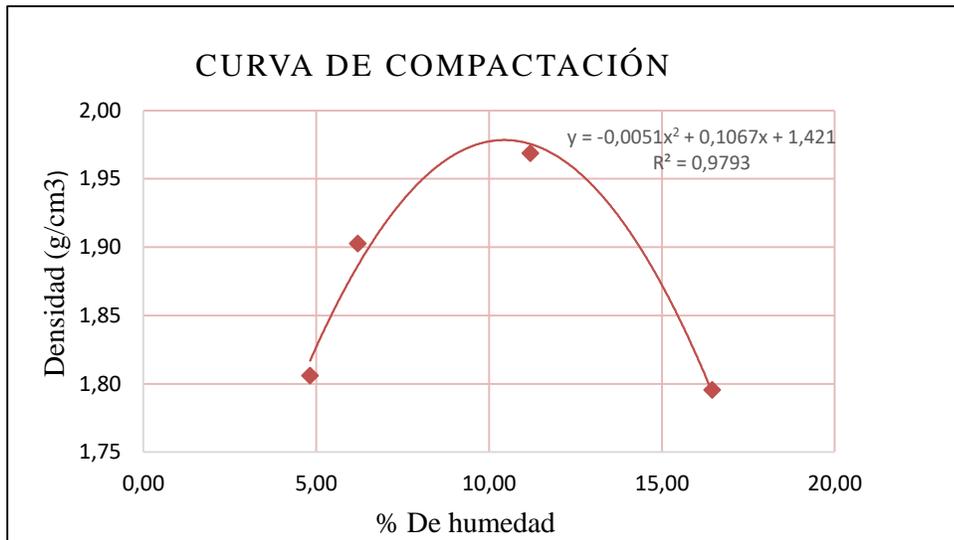
Muestra	Suelo	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (gr/cm3)
M-3 T	A-6	11.7	1.95
M-12 T	A-7-5	15.8	1.77
M-13 T	A-7-5	16.6	1.8
M-14 T	A-6	13.6	1.9
M-15 T	A-6	16.7	1.97
M-4	A-4	10.5	2.0
M-2	A-7-6	15.9	1.7

Figura 3.19 Curva de compactación del proctor modificado suelo A-6 T



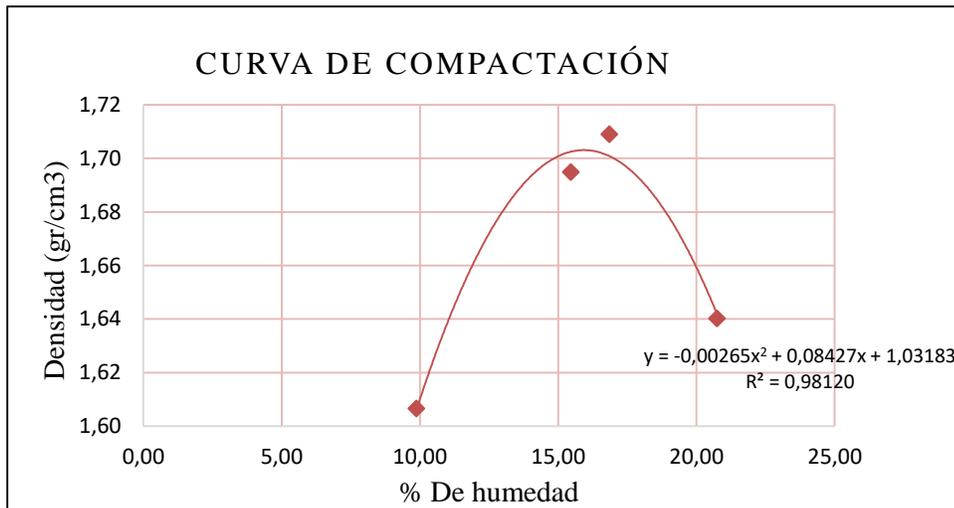
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20 Curva de compactación del proctor modificado suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21 Curva de compactación del proctor modificado suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Los valores iniciales de la humedad y densidad servirán para hacer comparaciones y evaluaciones a los suelos estabilizados con el sistema Rocamix. Sin embargo, los resultados indican una densidad baja y una elevada humedad optima característico de suelos finos (arcillosos y limosos).

3.8.4 Determinación de la relación de soporte de los suelos en el laboratorio (CBR) relación soporte de california (DESIGNACIÓN ASTM D1883 AASHTO T-193)

Para realizar la práctica de CBR nos apoyamos en la guía de determinación de CBR del manual de ensayos de suelos y materiales de la ABC explicado más detalladamente en el capítulo II con la designación ASTM D1883 AASHTO T-193.

Las ecuaciones empleadas para la realización de este ensayo son:

- Ecuación 2.13 ecuación generada para la determinación del CBR
- Donde se deberá tomar en cuenta la determinación del CBR, para las penetraciones de 0,1” y 0,2”.
- Ecuación 2.14 para la determinación del porcentaje de expansión de acuerdo a las lecturas realizadas por 4 días consecutivos.
- Los datos y resultados se tabularon en planillas tomando como modelo de planilla la sugerida en la Guía de laboratorio de la universidad local.

Figura 3.22 Compactación del suelo



Figura 3.23 Muestra en inmersión



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la prueba de relación soporte de california se presentan a continuación.

TABLA 3.15 Resultados de CBR de los suelos y la expansión

Muestra	Suelo	CBR (%) al 95%	Expansión
M-3 T	A-6	3.48	3.26
M-12 T	A-7-5	2.65	3.60
M-13 T	A-7-5	2.96	3.46
M-14 T	A-6	3.22	3.11
M-15 T	A-6	3.53	3.08
M-4	A-4	5.25	2.07
M-2	A-7-6	2.56	3.64

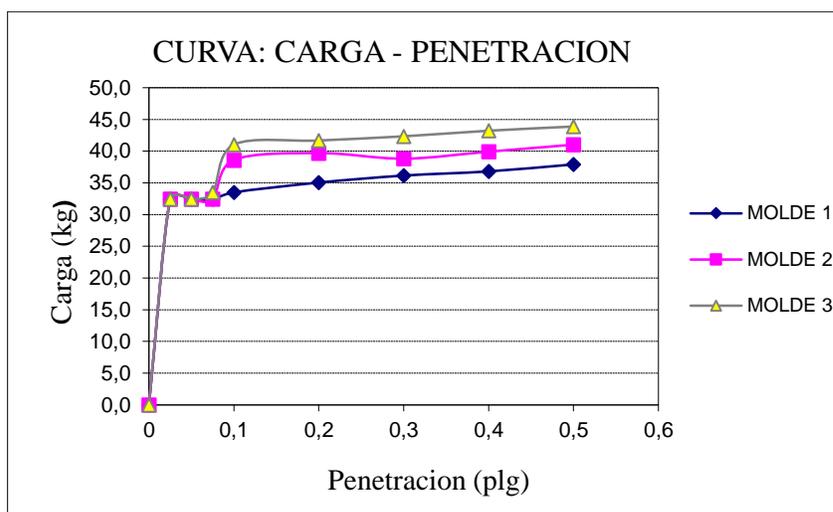
Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Con los resultados arrojados se observa que los suelos son relativamente expansivos y tienen un valor bajo de soporte por lo cual su condición los convierte en suelos con limitaciones para ser utilizados, por lo que requerirán ser mejorado para que cumplan con especificaciones mínimas en subrasantes, ya que según especificaciones la expansión deberá ser menor a 3% y un CBR mayor a 4% según lo que establece la normativa local (Especificaciones técnicas generales, Administradora Boliviana de Carreteras).

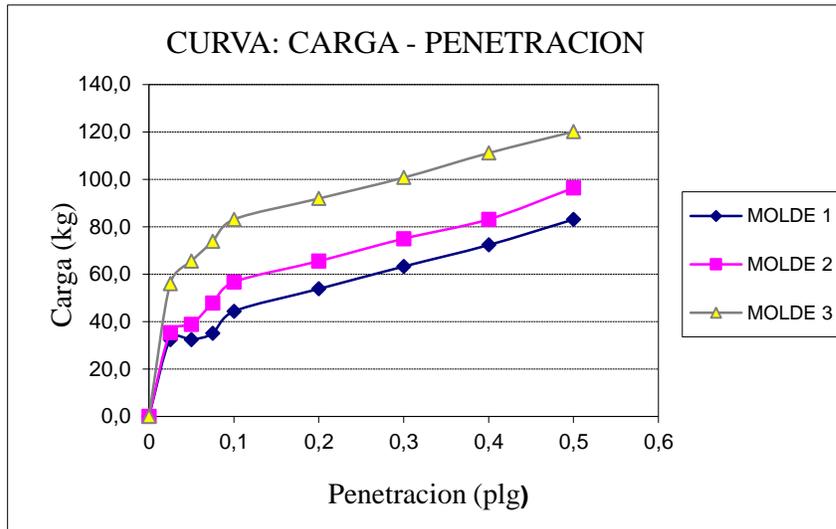
A continuación, se muestran las curvas de carga vs penetración para los suelos.

Figura 3.24 Curva de carga vs penetración del CBR suelo A-6 T



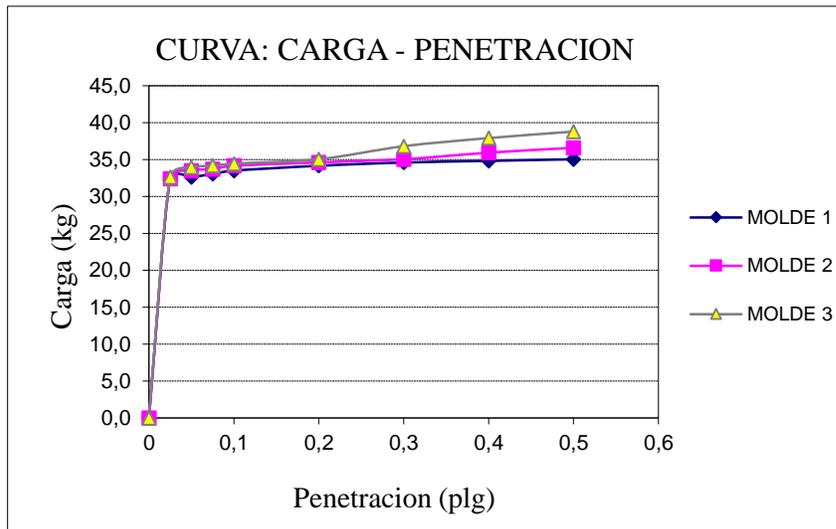
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25 Curva de carga vs penetración del CBR suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.26 Curva de carga vs penetración del CBR suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

3.9 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONFORMACIÓN DE LA SUBRASANTE

Los materiales para la conformación de la subrasante deben de tener ciertas características específicas, de modo a permitir la construcción de un macizo estable y adecuado soporte de pavimento.

TABLA 3.16 Especificaciones del CBR y expansión

CBR mínimo requerido (%)	4
Expansión máxima requerida (%)	3

Fuente: Especificaciones técnicas generales (ABC)

TABLA 3.17 Clasificación de la subrasante (AASHTO), según el valor de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Sub – rasante
5 - 8	Mala	Sub – rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub – rasante
20 - 30	Excelente	Sub – rasante
30 - 60	Buena	Sub – base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: AASHTO 1988

Consideraciones

De acuerdo a la tabla 3.16 que establece valores mínimos y máximos para suelos que puedan ser utilizables en subrasantes, se verifica según resultados obtenidos de los suelos en su estado natural que los mismos no son aptos para ser utilizados, se aprecia también que los suelos entran en una clasificación “Muy mala” de acuerdo a tabla 3.17 clasificación de la subrasante (AASHTO), sacando conclusiones que los suelos necesitan ser mejorados para que cumplan especificaciones técnicas en subrasantes.

3.10 ESPECIFICACIONES Y VERIFICACIÓN PARA APLICAR EL SISTEMA ROCAMIX

Como se menciona en el capítulo II, el nuevo sistema Rocamix LIQUIDO ofrece múltiples aplicaciones dentro de la ingeniería civil, pudiendo ser utilizable en varias áreas por sus múltiples beneficios que ofrece cuando se trata de mejorar la calidad de los suelos que presentan ciertas deficiencias cuando se los pretende utilizar como base o fundación de alguna obra de ingeniería.

Aunque este producto tiene muchos beneficios a la hora de ser utilizado también presenta ciertas limitantes para poder ser aplicable a los suelos del lugar, si bien se presentan limitantes para trabajar los suelos con el aditivo Rocamix, este tiene un solo fin de alcanzar los resultados óptimos, donde aquel suelo que cumpla con el teorema Rocamix facilitara el tratamiento con el aditivo.

El teorema Rocamix se explicó de manera detallada en el capítulo II, este teorema tiene la designación 10+10+20.

Para todos los suelos que no tienen estas características, se harán pruebas de laboratorio con Suelo natural más Rocamix más Aditivo sólido para determinar la dosis exacta y mezclas de estos, con el fin de obtener el "efecto Rocamix".

En el caso más extremo, se proporcionará una adición de arcilla de 3 a 5% y se mezclará con el suelo a tratar.

A continuación, se hará la verificación de algunos suelos seleccionados anteriormente como referencia, con el teorema Rocamix para verificar su compatibilidad y de esa manera obtener los mejores resultados.

TABLA 3.18 Resultados de las especificaciones suelo A-6 T

Designación	Resultado	Especificaciones	Observación
% que pasa el Tamiz N° 200	90.51	>10	CUMPLE
Índice de Plasticidad (IP)	11	>10	CUMPLE
Limite Liquido (LL)	27	>20	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

TABLA 3.19 Resultados de las especificaciones suelo A-4

Designación	Resultado	Especificaciones	Observación
% que pasa el Tamiz N° 200	68.27	>10	CUMPLE
Índice de Plasticidad (IP)	10	>10	CUMPLE
Limite Liquido (LL)	28	>20	CUMPLE

TABLA 3.20 Resultados de las especificaciones suelo A-7-6

Designación	Resultado	Especificaciones	Observación
% que pasa el Tamiz N° 200	95.89	>10	CUMPLE
Índice de Plasticidad (IP)	31	>10	CUMPLE
Limite Liquido (LL)	55	>20	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

4 APLICACIÓN PRÁCTICA

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizara la aplicación de la investigación propuesta con la nueva tecnología Rocamix (aditivo Rocamix más cemento portland), luego de la selección de las muestras de suelos que fueron elegidas en el capítulo III, que según AASHTO responden a la clasificación A-4, A-6, A-7, luego de una comparación con la designación Rocamix, se clasificaron como un suelo A-4 en un R2, y los suelos A-6 y A-7 en una clasificación R3, cada clasificación según Rocamix tiene asignado una cantidad de Rocamix liquido más una proporción de cemento, pero con el propósito de analizar y encontrar la dosificación más óptima aplicados a los suelos que tenemos en el medio local se determinó trabajar con distintas dosificaciones partiendo de una patrón como indica la tecnología Rocamix, explicada en el capítulo II.

Luego de definir las distintas dosificaciones que serán añadidas, a las muestras estabilizadas se le ensayaran los siguientes ensayos límites de consistencia, determinación de la humedad óptima y densidad máxima, relación soporte california (CBR), y ascensión capilar para finalizar con un análisis y comentar si las propiedades se mantienen, disminuyen o sufrieron un incremento, es decir cuánto incrementaron o disminuyeron comparadas a las muestras sin estabilizar y verificar si después de ser estabilizadas cumplen con la normativa local como para ser utilizadas en una subrasante.

Una vez definidas las cantidades óptimas de ambos estabilizantes se elaborará precios unitarios a las distintas dosificaciones añadidas, para posteriormente llevar a una comparación de costos con métodos tradicionales que se ya se realizan en el medio local.

De igual manera se realizará un cronograma de actividades del tiempo que lleva estabilizar una subrasante con esta novedosa tecnología.

4.2 ELABORACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN

4.2.1 Preparación y dosificación de las muestras

Antes de realizar la preparación y determinar las distintas dosificaciones de la composición de aditivo que consiste en un sistema de combinación de (Rocamix liquido más cemento portland), se debe fijar la dosificación patrón que recomienda la empresa Rocamix que está en función de la clasificación que tienen nuestras muestras comparadas con la propia clasificación de la empresa, que tiene una categorización llamada R1, R2, y R3. Las proporciones que corresponden para cada categorización fueron detalladas en el capítulo II.

Como nuestras muestras seleccionadas en el capítulo III bajo un análisis previo, para aplicar el procedimiento que se tiene previsto en esta investigación, se clasificaron según AASHTO en un tipo de suelo A-4(suelo limoso), A-6 (suelo arcilloso), y un A-7 (suelo arcilloso), y comparando con la clasificación que tiene la empresa Rocamix estas muestras responden a la siguiente categorización R2 Y R3, a continuación en la siguiente tabla se mostrara la dosificación patrón recomendada por la empresa Rocamix para estas muestras seleccionadas.

TABLA 4.1 Dosificaciones de la empresa Rocamix

Clasificación AASHTO	Clasificación según Rocamix	Litro de producto Rocamix por m ³	Kilogramo de cemento por m ³
A-4	R2	0.50	15 – 20
A-6	R3	0.60	20 – 25
A-7	R3	0.60	20 – 25

Fuente: Manual de aplicación de la tecnología Rocamix

4.2.2 Experimentación de dosificaciones

Después de definir una dosificación patrón por la empresa Rocamix, respaldada en varias investigaciones realizadas en el instituto politécnico superior “JOSÉ ANTONIO ECHEVERRÍA” Habana (CUBA). Por la aplicación que se pretende realizar este estudio en nuestro departamento con los suelos que encontramos en el medio local, a partir de la dosificación patrón se estableció una serie de dosificaciones menores y mayores, esto para verificar el comportamiento o como responderán estos suelos ante

una estabilización de este tipo, se busca analizar la variabilidad en dosificaciones y partir de curvas que se generaran con las distintas dosificaciones analizándolas y encontrar la dosificación más óptima que esté acorde a las especificaciones técnicas y económicas respecto a nuestro medio local.

Cabe recordar que para definir la cantidad de aditivo liquido Rocamix más aditivo solido (cemento), estas estarán en función a lo que pesa en Kg el suelo por m³.

A continuación, se mostrará en una tabla las distintas dosificaciones adoptadas para cada una de las muestras, resaltando que las cantidades determinadas son para estabilizar un m³ de suelo natural.

Observación: se hace notar, en la figura 4.1 la 2da. Dosificación corresponde a la establecida por la empresa Rocamix, como base o referencia para aplicar a las muestras de suelo.

TABLA 4.2 Dosificaciones de Rocamix para la clasificación A-4

Dosificaciones	Rocamix (ml) por 1 kg de tierra	% en W	Rocamix (l) por 1 kg de tierra	Rocamix (l/m ³)	Unidad
1	0.20	0.018	0.00020	0.40	l/m ³
2	0.25	0.022	0.00025	0.50	l/m ³
3	0.30	0.027	0.00030	0.60	l/m ³
4	0.35	0.031	0.00035	0.70	l/m ³

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.3 Dosificaciones de cemento para la clasificación A-4

Dosificaciones	Cemento (gr) por 1 kg de tierra	% en W	Cemento (kg) por 1 kg de tierra	Cemento (kg/m ³)	Unidad
1	5.05	0.51	0.0050	10	Kg/m ³
2	10.10	1.01	0.0101	20	Kg/m ³
3	15.15	1.52	0.0151	30	Kg/m ³
4	20.20	2.02	0.0202	40	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.4 Dosificaciones de Rocamix para la clasificación A-6

Dosificaciones	Rocamix (ml) por 1 kg de tierra	% en W	Rocamix (l) por 1 kg de tierra	Rocamix (l/m ³)	Unidad
1	0.26	0.023	0.00026	0.50	l/m ³
2	0.31	0.027	0.00031	0.60	l/m ³
3	0.36	0.032	0.00036	0.70	l/m ³
4	0.41	0.036	0.00041	0.80	l/m ³

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.5 Dosificaciones de cemento para la clasificación A-6

Dosificaciones	Cemento (gr) por 1 kg de tierra	% en W	Cemento (kg) por 1 kg de tierra	Cemento (kg/m ³)	Unidad
1	7.69	0.77	0.00769	15	Kg/m ³
2	12.82	1.28	0.01282	25	Kg/m ³
3	17.95	1.79	0.01795	35	Kg/m ³
4	23.08	2.31	0.02308	45	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.6 Dosificaciones de Rocamix para la clasificación A-7-6

Dosificaciones	Rocamix (ml) por 1 kg de tierra	% en W	Rocamix (l) por 1 kg de tierra	Rocamix (l/m ³)	Unidad
1	0.29	0.026	0.00029	0.50	l/m ³
2	0.35	0.031	0.00035	0.60	l/m ³
3	0.41	0.036	0.00041	0.70	l/m ³
4	0.47	0.041	0.00047	0.80	l/m ³

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.7 Dosificaciones de cemento para la clasificación A-7-6

Dosificaciones	Cemento (gr) por 1 kg de tierra	% en W	Cemento (kg) por 1 kg de tierra	Cemento (kg/m ³)	Unidad
1	8.82	0.88	0.00882	15	Kg/m ³
2	14.71	1.47	0.01471	25	Kg/m ³
3	20.59	2.06	0.02059	35	Kg/m ³
4	26.47	2.65	0.02647	45	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia

Consideraciones:

Para una mejor interpretación de las dosificaciones se presentarán las siguientes tablas, haciendo referencia a que cantidad de producto líquido Rocamix más una cantidad de cemento se deben agregar a una muestra de suelo de 1 kg, esto porque el kilogramo es la unidad patrón de medición que se maneja en laboratorio.

Para aclarar que cuando se menciona la dosificación 1, 2, 3, y 4 no es nada más que una combinación de dos productos del Rocamix líquido y cemento portland, para el proceso de aplicación entre el aditivo y el suelo se explicó de manera detallada todo el proceso en el capítulo II, sin embargo cabe recordar que la cantidad de cemento debe ser añadida al suelo, y la cantidad de Rocamix deber ser mezclada con la cantidad de agua determinada en el ensayo de proctor modificado correspondiente a la humedad óptima.

TABLA 4.8 Dosificaciones para la clasificación A-4

Dosificaciones	1 kg de tierra	
	Rocamix (ml)	Cemento (gr)
1	0.20	5.05
2	0.25	10.10
3	0.30	15.15
4	0.35	20.20

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.9 Dosificaciones para la clasificación A-6

Dosificaciones	1 kg de tierra	
	Rocamix (ml)	Cemento (gr)
1	0.26	7.69
2	0.31	12.82
3	0.36	17.95
4	0.41	23.08

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.10 Dosificaciones para la clasificación A-7-6

Dosificaciones	1 kg de tierra	
	Rocamix (ml)	Cemento (gr)
1	0.29	8.82
2	0.35	14.71
3	0.41	20.59
4	0.47	26.47

Fuente: Elaboración propia

De aquí en adelante se hace notar que para todos los ensayos se maneja la nomenclatura de dosificación 1, 2, 3, y 4.

4.3 PREPARACIÓN PROCESOS Y RESULTADOS DE LOS SUELOS ESTABILIZADOS CON LA TECNOLOGÍA ROCAMIX

4.3.1 Determinación de los límites de consistencia alcanzados a diferentes porcentajes de Rocamix más cemento

4.3.1.1 Proceso y resultados del suelo estabilizado en el ensayo de límites de consistencia

Para determinar los límites de consistencia se siguieron el mismo procedimiento que se utilizó en la caracterización de las muestras, correspondiente al ensayo de límites de consistencia explicado en el capítulo II. A continuación, se presentan las tablas y

gráficos de resultados de las muestras que corresponden al barrio de aplicación torrecillas, más dos muestras como referencia de otros barrios, de los límites de consistencia del suelo estabilizado.

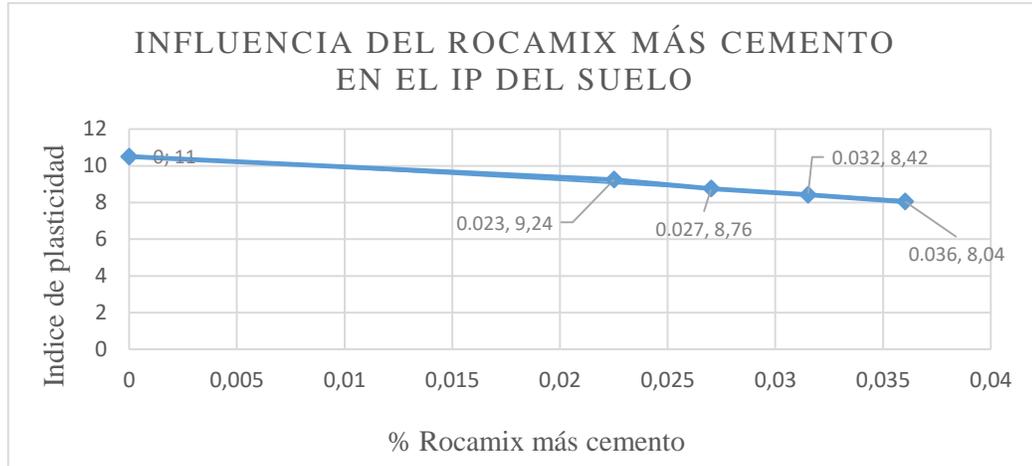
TABLA 4.11 Resultados límites de consistencia del suelo estabilizado del barrio Torrecillas

Muestra		LL	LP	IP	NOTA: Datos para construir la figura 4.1 influencia del Rocamix + cemento en el IP de los suelos.
M-3 A-6	Natural	26.85	16.35	10.50	
	Dosif. 1	26.26	17.02	9.24	
	Dosif. 2	25.73	16.97	8.76	
	Dosif. 3	25.50	17.08	8.42	
	Dosif. 4	25.12	17.08	8.04	
M-12 A-7-5	Natural	46.65	30.17	16.47	
	Dosif. 1	45.90	30.92	14.98	
	Dosif. 2	45.44	31.06	14.38	
	Dosif. 3	45.24	31.21	14.03	
	Dosif. 4	44.87	31.35	13.52	
M-13 A-7-5	Natural	46.77	36.09	10.68	
	Dosif. 1	46.36	36.45	9.91	
	Dosif. 2	45.90	36.75	9.15	
	Dosif. 3	45.74	36.86	8.88	
	Dosif. 4	45.39	37.09	8.30	
M-14 A-6	Natural	38.18	21.49	16.68	
	Dosif. 1	37.56	22.75	14.81	
	Dosif. 2	37.12	22.99	14.13	
	Dosif. 3	36.91	23.27	13.64	
	Dosif. 4	36.60	23.50	13.10	
M-15 A-6	Natural	39.42	22.97	16.45	
	Dosif. 1	38.95	24.13	14.81	
	Dosif. 2	38.10	23.92	14.18	
	Dosif. 3	37.82	24.07	13.75	
	Dosif. 4	37.23	23.97	13.26	

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan las gráficas de cómo influye Rocamix sobre el IP del suelo natural.

Figura 4.1 Influencia del Rocamix más cemento en el IP M-3 A-6



Fuente: Elaboración propia

Observación: De la figura 4.1 se observa que añadiendo Rocamix más cemento en % de 0.023 hasta 0.036% en un suelo de la clasificación A-6 el IP del suelo estabilizado disminuye en 3 valores respecto al natural.

TABLA 4.12 Resultados límites de consistencia del suelo estabilizado A-4

Suelos +	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
LL (%)	27.86	26.55	26.34	26.00	25.78
LP (%)	18.21	18.14	18.26	18.28	18.36
IP	9.66	8.41	8.08	7.72	7.41

Figura 4.2 Influencia del Rocamix más cemento en el IP suelo A-4

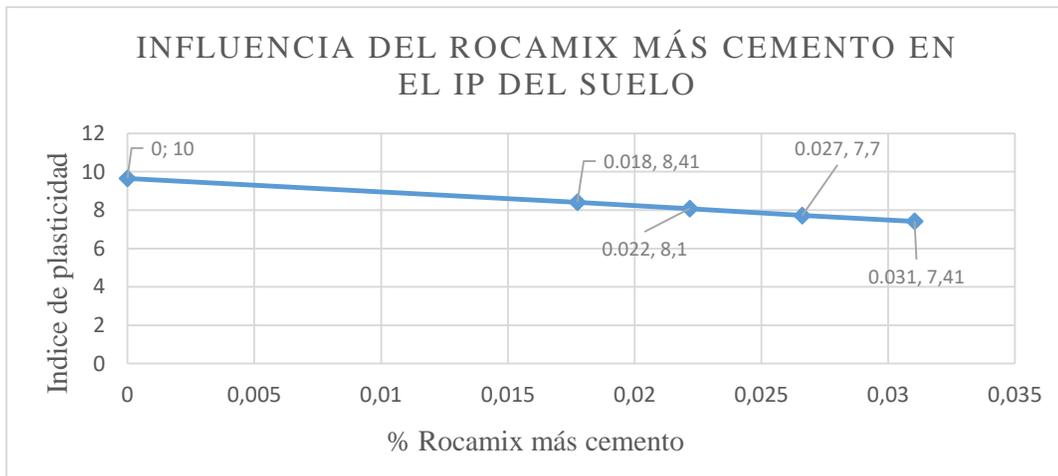
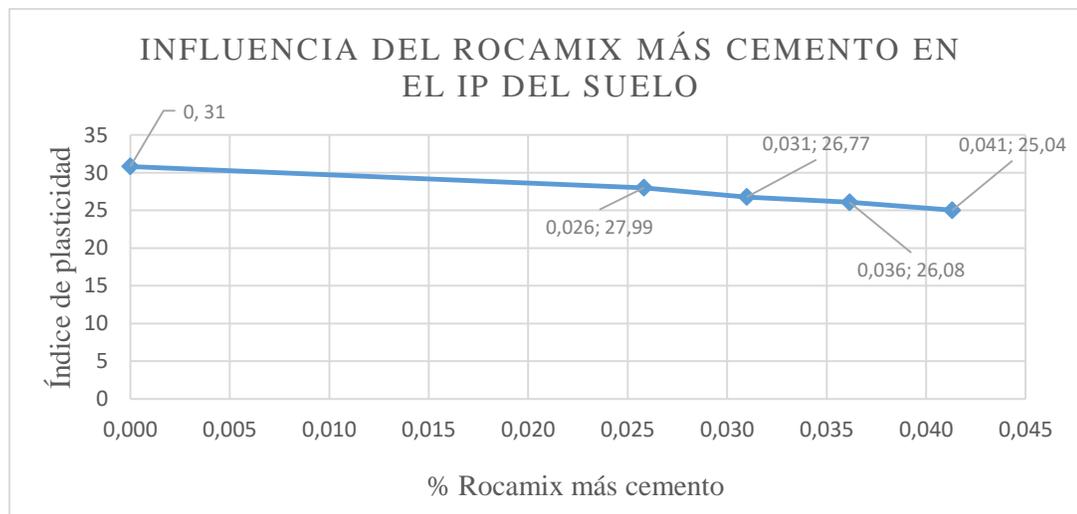


TABLA 4.13 Resultados límites de consistencia del suelo estabilizado A-7-6

Suelos +	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
LL (%)	55.30	53.07	52.16	51.63	50.85
LP (%)	24.46	25.08	25.39	25.55	25.82
IP	30.84	27.99	26.77	26.08	25.04

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3 Influencia del Rocamix más cemento en el IP suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

Observación: En la figura 4.3 se observa que añadiendo % de Rocamix más cemento desde 0.026 hasta 0.041% sobre un suelo A-7-6 los valores de IP del suelo estabilizado disminuyen favorablemente hasta 6 valores respecto al natural.

Análisis de resultados

Con los siguientes resultados presentados en tablas, se observa que en todas las muestras propuestas para esta investigación el límite líquido reduce comparándolo con el del suelo natural, mientras que el límite plástico incrementa su valor, provocando que el índice de plasticidad reduzca considerablemente entre valores de 2 hasta 6, resultando que la muestra de suelo estabilizada presente cambios volumétricos menores a las del suelo natural, ante la presencia de agua.

4.3.2 Determinación de la humedad óptima y la densidad máxima alcanzada en laboratorio utilizando diferentes porcentajes de Rocamix más cemento.

4.3.2.1 Elaboración de dosificaciones para la realización del ensayo

Primeramente, se prepara 3 kg de suelo, y se adiciona los distintos porcentajes de Rocamix más cemento para determinar la densidad máxima y la humedad óptima.

Se le añadirá a cada muestra de suelo las cantidades que a continuación se presentan en la tabla 4.14

TABLA 4.14 Dosificaciones de Rocamix más cemento

Clasificación AASHTO	Cantidad de suelo (kg)	Dosif. 1		Dosif. 2		Dosif. 3		Dosif. 4	
		Rocamix ml	Cemento gr						
A-4	3.00	0.61	15.15	0.76	30.30	0.91	45.45	1.06	60.61
A-6	3.00	0.77	23.08	0.92	38.46	1.08	53.85	1.23	69.23
A-7-6	3.00	0.88	26.47	1.06	44.12	1.24	61.76	1.41	79.41

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 Proceso y resultados del suelo estabilizado en compactación

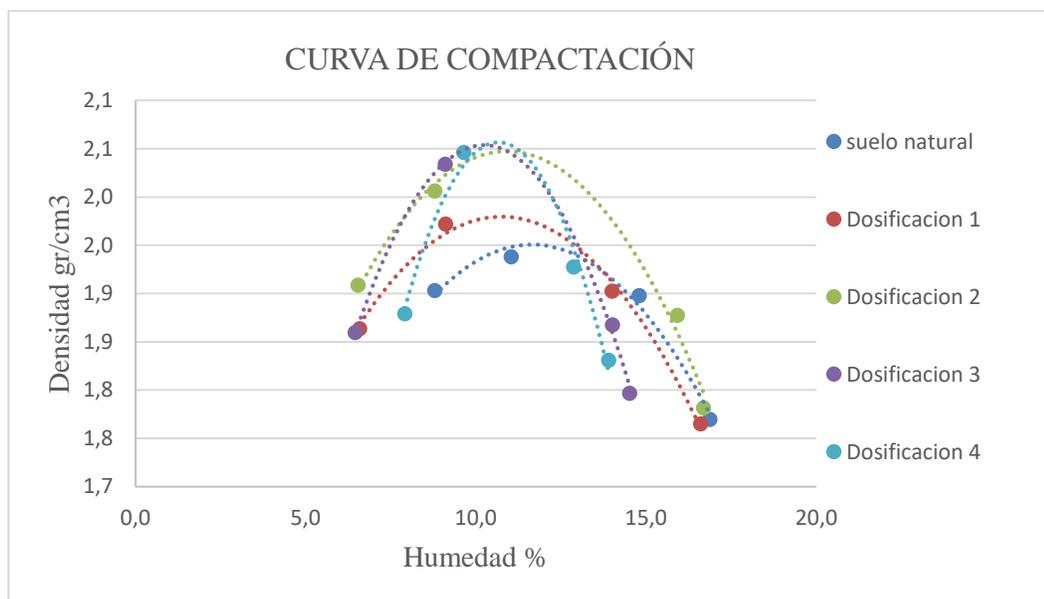
NOTA: Después del proceso de mezclar el suelo con el cemento, se comienza a añadir la cantidad de agua requerida (incluyendo la cantidad de Rocamix concentrado), logrando una distribución homogénea del agua en toda superficie del suelo.

TABLA 4.15 Humedad óptima y densidad máxima alcanzada a diferentes porcentajes de Rocamix más cemento barrió Torrecillas

Suelos +		Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
M-3 A-6	CHO. %	11.66	10.78	10.92	10.27	10.67
	Dens max gr/cm ³	1.95	1.98	2.05	2.06	2.06
M-12 A-7-5	CHO. %	15.83	15.79	14.22	14.11	13.43
	Dens max gr/cm ³	1.77	1.80	1.82	1.84	1.84
M-13 A-7-5	CHO. %	16.56	16.12	15.75	15.48	14.69
	Dens max gr/cm ³	1.80	1.84	1.85	1.87	1.87
M-14 A-6	CHO. %	13.60	13.38	13.36	13.23	12.81
	Dens max gr/cm ³	1.93	1.94	1.97	1.99	2.00
M-15 A-6	CHO. %	16.75	15.62	15.95	15.59	15.21
	Dens max gr/cm ³	1.97	1.99	2.02	2.05	2.07

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Curva de compactación distintos porcentajes de Rocamix más cemento muestra M-3 A-6



Fuente: Elaboración propia

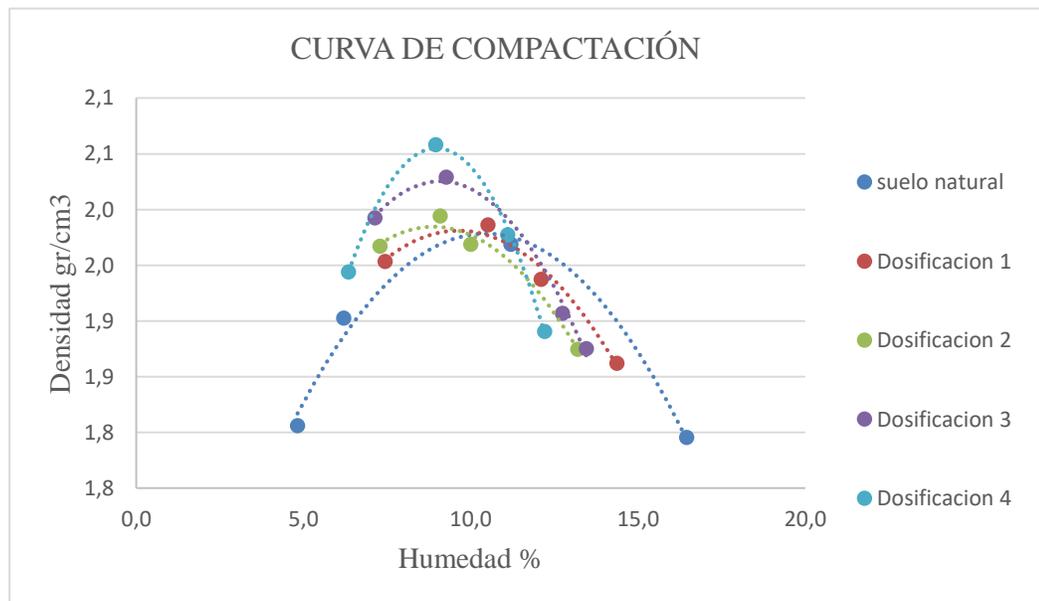
Observación: De la figura 4.4 curva de compactación de un suelo A-6 a diferentes % de Rocamix más cemento que van desde 0.023 hasta 0.036%, se observa que el CHO disminuye desde la primera dosificación respecto a la natural, y la densidad máx. Se incrementa hasta un valor de 5.94% respecto a la natural.

TABLA 4.16 Humedad óptima y densidad máxima alcanzada a diferentes porcentajes de Rocamix más cemento suelo A-4

Suelos +	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
CHO. %	10.46	9.66	8.96	9.08	8.97
Dens. max gr/cm ³	1.98	1.98	1.99	2.02	2.05

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Curva de compactación distintos porcentajes de rocamix + cemento suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

Observación: De la figura 4.5 curva de compactación de un suelo A-4 a distintos % de Rocamix + cemento que van desde 0.018 hasta 0.031%, se observa que a todas las

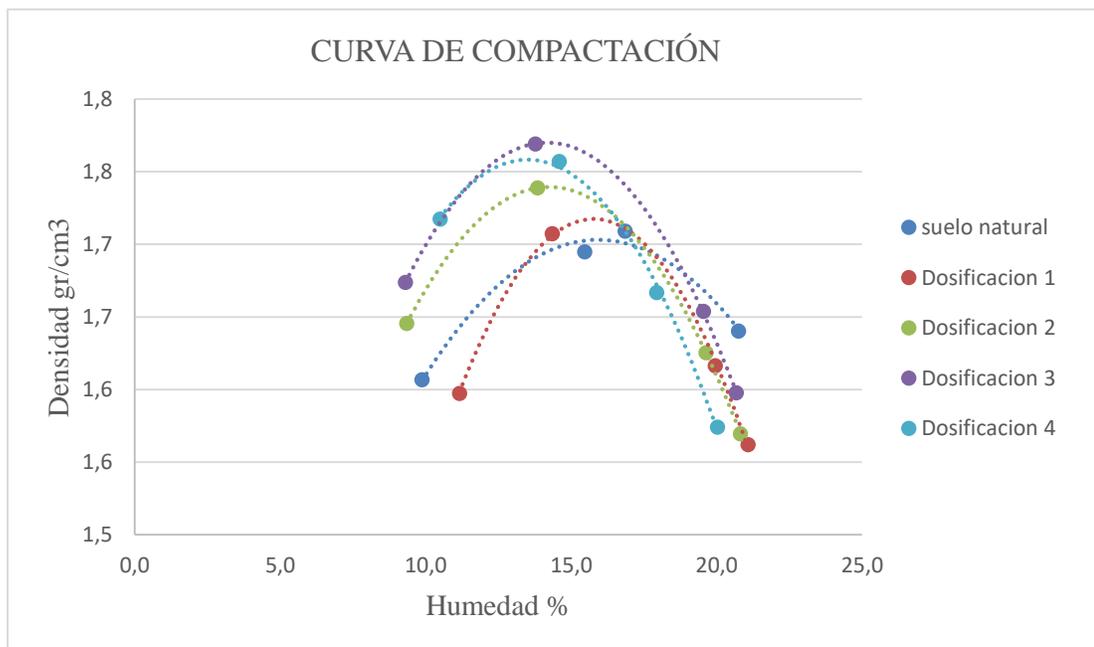
dosificaciones añadidas la densidad max. incrementa su valor en 4.04% respecto a la natural, y el CHO disminuye comparándolo a la del suelo natural.

TABLA 4.17 Humedad óptima y densidad máxima alcanzada a diferentes porcentajes de Rocamix más cemento suelo A-7-6

Suelos +	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
CHO. %	15.90	15.79	14.35	14.04	13.47
Dens max gr/cm ³	1.70	1.72	1.75	1.76	1.76

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Curva de compactación a distintos porcentajes de rocamix + cemento suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

Respecto a la humedad óptima se puede verificar que las muestras ensayadas con las distintas dosificaciones tienden a tener humedades cercanas a la del suelo natural, sufriendo un leve descenso.

4.3.3 Determinación del CBR y expansión de los suelos estabilizados a diferentes porcentajes de Rocamix más cemento.

4.3.3.1 Elaboración de dosificaciones para la realización del ensayo

Para la confección de las probetas a ensayar en el CBR se propone alcanzar las condiciones de densidades máximas con las humedades encontradas para cada una de las dosificaciones. A continuación, se muestran en la siguiente tabla las dosificaciones para elaborar los moldes de CBR, con una cantidad aproximada de suelo de 6 kg según lo indica el manual de ensayos de suelos de la ABC.

TABLA 4.18 Dosificaciones de Rocamix más cemento

Clasificación AASHTO	Cantidad de suelo (kg)	Dosif. 1		Dosif. 2		Dosif. 3		Dosif. 4	
		Rocamix ml	Cemento gr						
A-4	6.00	1.21	30.30	1.52	60.61	1.82	90.91	2.12	121.21
A-6	6.00	1.54	46.15	1.85	76.92	2.15	107.69	2.46	138.46
A-7-6	6.00	1.76	52.94	2.12	88.24	2.47	123.53	2.82	158.82

4.3.3.2 Proceso y resultados del suelo estabilizado en CBR

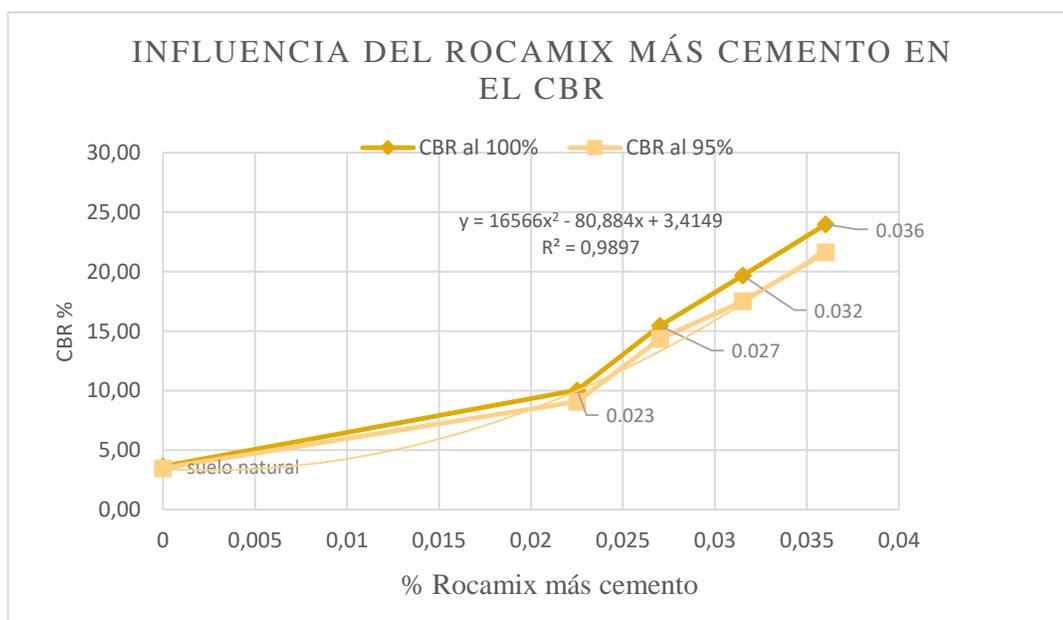
Las cantidades determinadas de Rocamix y cemento están en función a las tablas 4.8, 4.9, y 4.10. Cabe señalar que la cantidad de Rocamix debe agregarse a la cantidad de agua determinada en la compactación, realizando un buen mezclado para que el producto llegue en la misma cantidad a toda la muestra del suelo, al igual que el cemento.

TABLA 4.19 CBR al 100% y al 95% de la mezcla suelo más Rocamix más cemento en las muestras barrio Torrecillas

Suelos +		Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
M-3 A-6	CBR al 100 %	3.65	10.03	15.45	19.68	23.97
	CBR al 95 %	3.48	9.07	14.36	17.51	21.63
M-12 A-7-5	CBR al 100 %	2.69	9.32	14.56	18.99	21.59
	CBR al 95 %	2.65	8.73	12.60	16.72	20.04
M-13 A-7-5	CBR al 100 %	3.04	9.89	14.99	19.41	22.09
	CBR al 95 %	2.96	9.04	13.12	17.05	20.32
M-14 A-6	CBR al 100 %	3.38	10.14	15.16	19.60	22.20
	CBR al 95 %	3.22	9.18	14.08	18.06	20.37
M-15 A-6	CBR al 100 %	3.75	10.41	15.61	19.53	24.17
	CBR al 95 %	3.53	9.22	14.46	18.25	22.12

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7 Influencia del Rocamix más cemento en el CBR con relación al suelo natural M-3 A-6



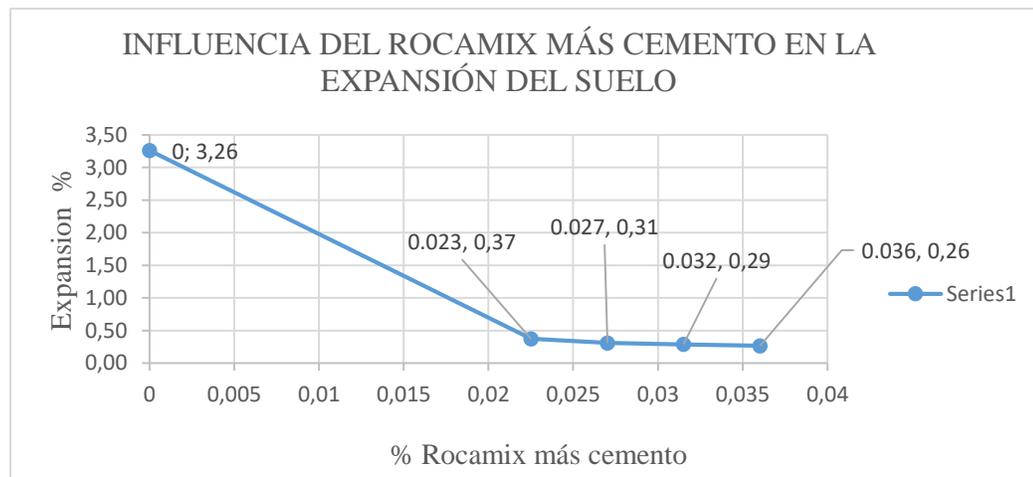
Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.20 Expansión de la mezcla Suelo más Cemento y Rocamix en las muestras barrio Torrecillas

Muestra		Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
M-3 A-6	Expansión	3.26	0.37	0.31	0.29	0.26
M-12 A-7-5	Expansión	3.60	0.49	0.40	0.35	0.30
M-13 A-7-5	Expansión	3.46	0.43	0.39	0.37	0.31
M-14 A-6	Expansión	3.11	0.33	0.30	0.28	0.26
M-15 A-6	Expansión	3.08	0.30	0.29	0.26	0.22

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.8 Influencia del Rocamix más cemento en la expansión del suelo natural M-3 A-6



Fuente: Elaboración propia

Observación: En la figura 4.8 influencia del Rocamix más cemento sobre la expansión de un suelo A-6, se observa que, desde la primera dosificación añadida al suelo natural, se registra un valor por debajo de 1, y partir de esta la expansión tiende a ser estable, cuando se añada % de Rocamix más cemento entre un 0.023 hasta un 0.036% (Rocamix), y un 0.77 hasta un 2.31% de cemento.

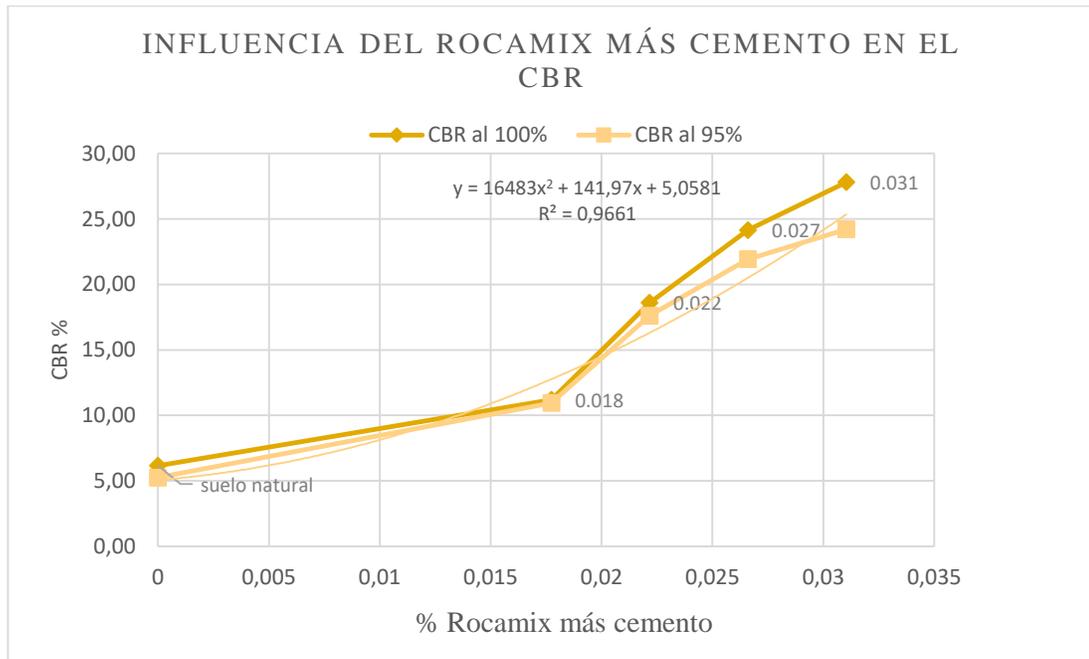
TABLA 4.21 CBR al 100% y 95% del suelo con Rocamix más cemento en la muestra

A-4

Suelos +	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
CBR al 100 %	6.17	11.19	18.60	24.16	27.81
CBR al 95 %	5.25	10.95	17.62	21.93	24.22

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9 Influencia del Rocamix más cemento en el CBR con relación al suelo natural suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

Observación: En la figura 4.9 se puede observar una ascendencia importante en el índice de CBR en un suelo A-4, añadiéndole % de Rocamix más cemento entre un 0,023 hasta un 0,036% (Rocamix), y 0,51 a 2,02% (cemento), teniendo una correlación buena con más del 90% entre los resultados, alcanzando el valor mínimo de CBR que exige la normativa local para una subrasante con la primera dosificación añadida al

suelo natural, estando por debajo esta dosificación a la que recomienda la empresa Rocamix para suelos limosos.

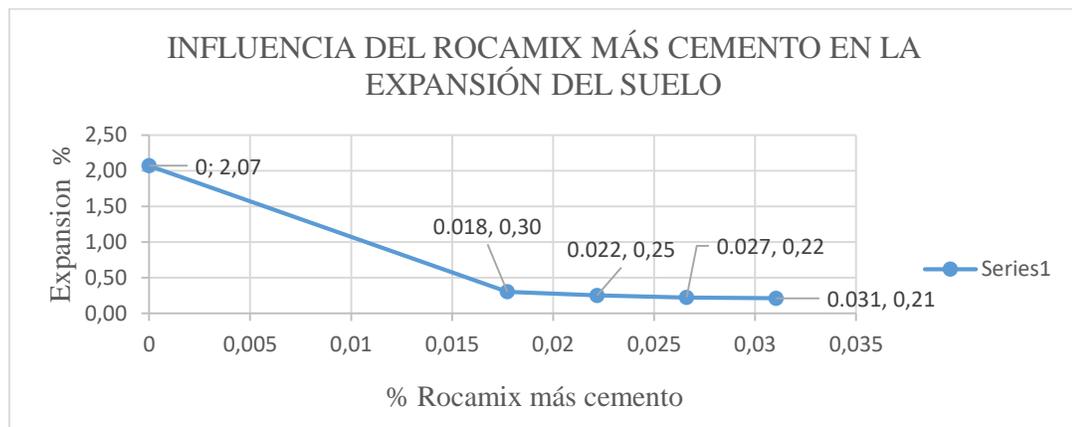
TABLA 4.22 Expansión de la mezcla suelo más cemento y Rocamix suelo A-4

Muestra	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
Expansión	2.07	0.30	0.25	0.22	0.21

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10 Influencia del Rocamix más cemento en la expansión del suelo natural A-

4



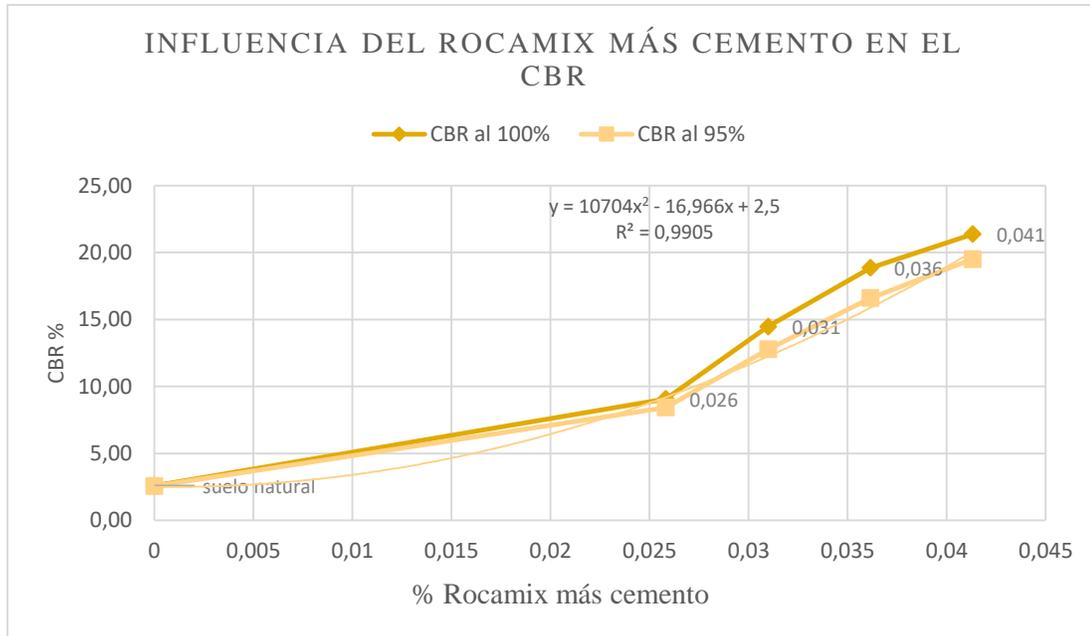
Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.23 CBR al 100% y al 95% de la mezcla suelo más Rocamix más cemento en el suelo A-7-6

Suelos +	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
CBR al 100 %	2.59	9.07	14.48	18.87	21.38
CBR al 95 %	2.56	8.44	12.78	16.60	19.52

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.11 Influencia del Rocamix más cemento en el CBR con relación al suelo natural suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

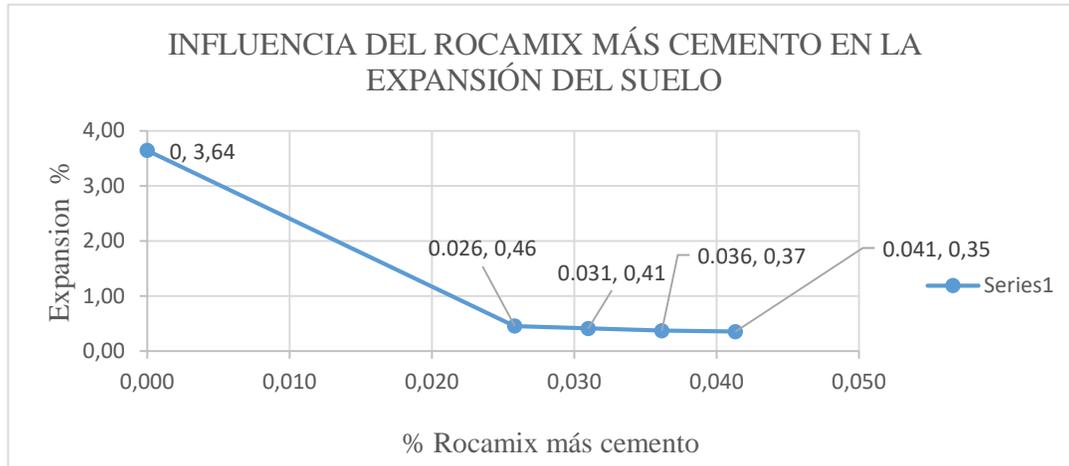
Observación: En la figura 4.11 se puede observar una ascendencia importante en el índice de CBR en un suelo A-7-6, añadiéndole % de Rocamix más cemento entre un 0,026 hasta un 0.041% (Rocamix), y 0.88 a 2.65% (cemento), teniendo una correlación buena con más del 90% entre los resultados, alcanzando el valor mínimo de CBR que exige la normativa local para una subrasante con la primera dosificación añadida al suelo natural, estando por debajo esta dosificación a la que recomienda la empresa Rocamix para suelos arcillosos.

TABLA 4.24 Expansión de la mezcla suelo más cemento y Rocamix suelo A-7-6

Muestra	Suelo natural	Dosif. 1	Dosif. 2	Dosif. 3	Dosif. 4
Expansión	3.64	0.46	0.41	0.37	0.35

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12 Influencia del Rocamix más cemento en la expansión del suelo natural (suelo A-7-6)



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Al añadirle a los suelos % de Rocamix entre 0.018 a 0.041 y de cemento entre 0.51 a 2.65% estos alcanzan valores de CBR altos, incluso a la mínima dosificación aplicada estando por debajo de la que recomienda la empresa Rocamix en su manual el CBR sobrepasa al valor mínimo establecido por las especificaciones locales como para ser utilizado en una subrasante que es de 4%. Aumentando el valor de 5 hasta 8 veces el CBR del suelo natural.

4.3.4 Determinación de la absorción capilar del suelo estabilizado con diferentes porcentajes de Rocamix más cemento

El ensayo de absorción capilar tiene como objetivo determinar la cantidad de agua que absorbe la muestra de suelo y el tiempo que puede permanecer bajo la acción del agua sin destruirse.

Para la confección de las probetas a ensayar se siguió el procedimiento de compactación estándar, se propone alcanzar las condiciones de densidad máximas con las humedades encontradas para cada una de las dosificaciones.

4.3.4.1 Elaboración de dosificaciones para la realización del ensayo de absorción capilar

A continuación, se muestran en la siguiente tabla las dosificaciones para elaborar los moldes de absorción capilar, con una cantidad aproximada de suelo de 3 kg según lo indica el manual de ensayos de Rocamix.

TABLA 4.25 Dosificaciones de Rocamix más cemento para absorción capilar

Clasificación AASHTO	Cantidad de suelo (kg)	Dosif. 1		Dosif. 2		Dosif. 3	
		Rocamix ml	Cemento gr	Rocamix ml	Cemento gr	Rocamix ml	Cemento gr
A-4	3.00	0.61	15.15	0.76	30.30	0.91	45.45
A-6	3.00	0.77	23.08	0.92	38.46	1.08	53.85
A-7-6	3.00	0.88	26.47	1.06	44.12	1.24	61.76

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.2 Proceso y resultados del suelo estabilizado en el ensayo de absorción capilar

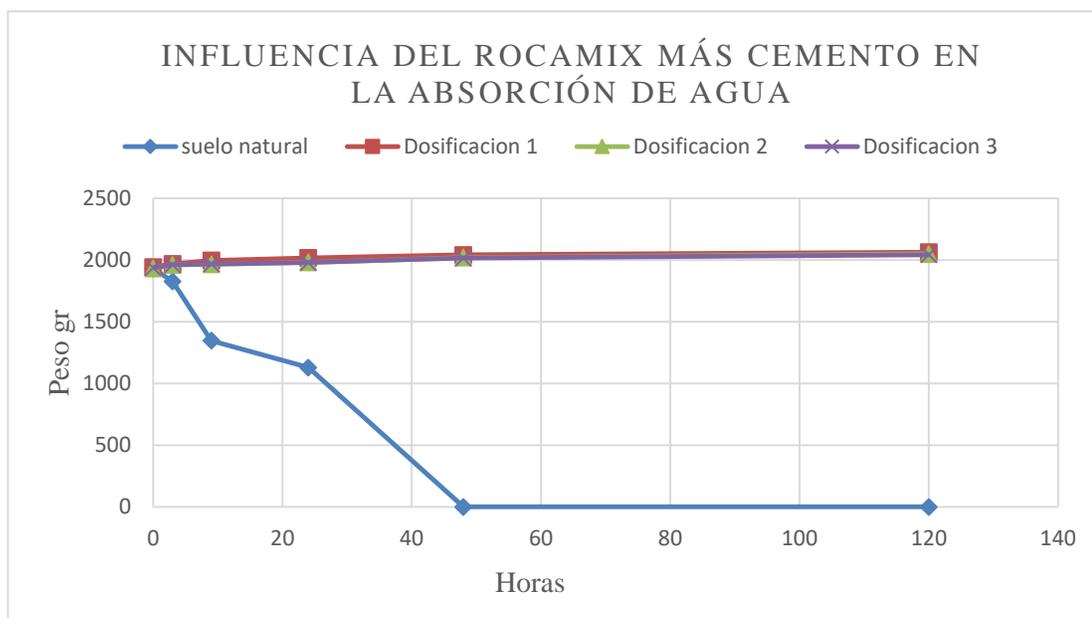
Cabe señalar que la cantidad de Rocamix debe agregarse a la cantidad de agua determinada en la compactación, realizando un buen mezclado para que el producto llegue en la misma cantidad a toda la muestra del suelo, al igual que el cemento.

TABLA 4.26 Resultados del ensayo absorción capilar suelo A-6

Horas	Suelo natural		Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3	
	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido
0	1931	0	1943	0	1933	0	1937	0
3	1825	0	1967	1.24	1959	1.35	1961	1.24
9	1346	0	1996	2.73	1965	1.66	1968	1.60
24	1129	0	2016	3.76	1980	2.43	1979	2.17
48	0	0	2041	5.04	2019	4.45	2015	4.03
120	0	0	2063	6.18	2048	5.95	2042	5.42

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13 Influencia del Rocamix más cemento en la absorción del agua suelo A-6



Fuente: Elaboración propia

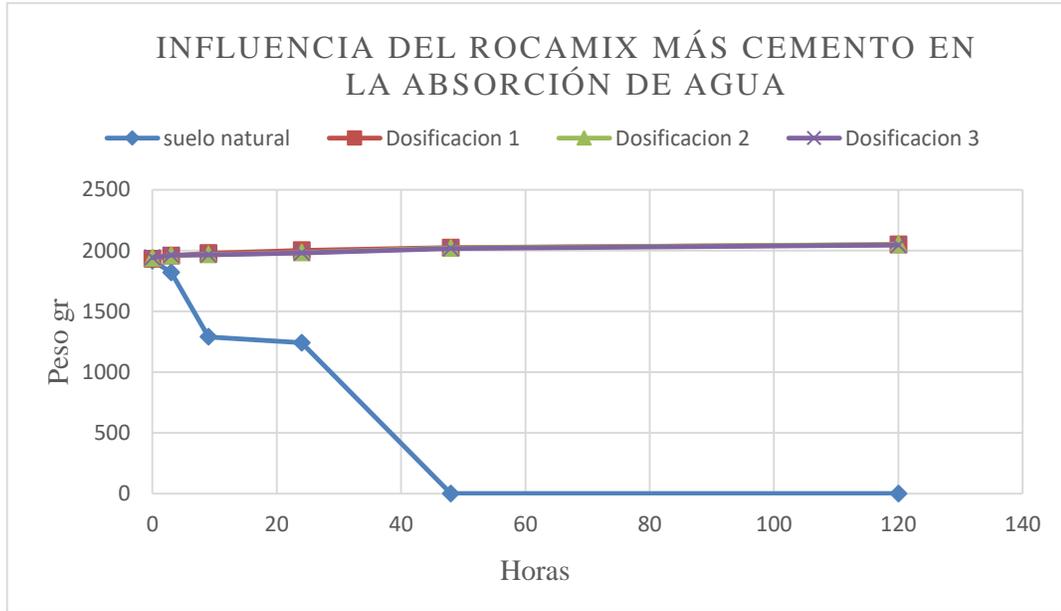
Observación: En la figura 4.13 se puede observar como una muestra de suelo A-6 estabilizada con Rocamix permanece estable cuando se la sumerge en agua, mientras que la muestra natural comienza a perder estabilidad a partir desde las primeras horas ante la presencia de agua.

TABLA 4.27 Resultados del ensayo absorción capilar suelo A-4

Horas	Suelo natural		Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3	
	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido
0	1917	0	1931	0	1939	0	1941	0
3	1820	0	1957	1.35	1961	1.13	1962	1.08
9	1290	0	1978	2.43	1967	1.44	1965	1.24
24	1241	0	2002	3.68	1983	2.27	1981	2.06
48	0	0	2024	4.82	2021	4.23	2017	3.92
120	0	0	2049	6.11	2051	5.78	2045	5.36

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14 Influencia del Rocamix más cemento en la absorción del agua suelo A-4



Fuente: Elaboración propia

Observación: En la figura 4.14 se puede observar que las muestras estabilizadas casi mantienen su peso inicial, incrementando muy poco, mientras que la muestra natural pierde totalmente su estructura, forma de las 50 hrs aproximadamente, verificando que el producto realiza una fuerte impermeabilización al suelo.

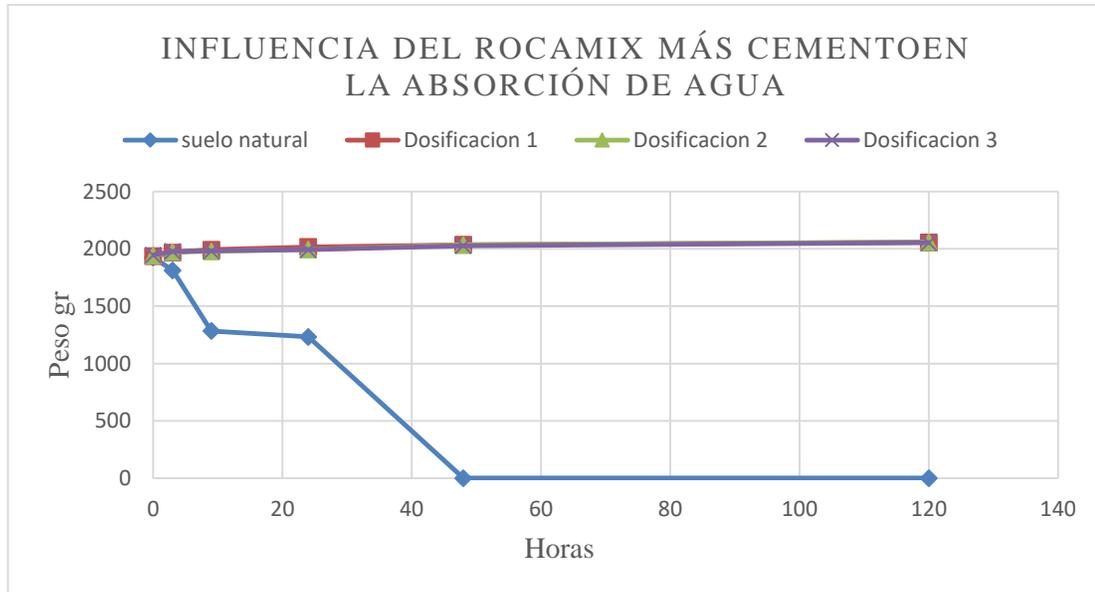
TABLA 4.28 Resultados del ensayo absorción capilar suelo A-7-6

Horas	Suelo natural		Dosificación 1		Dosificación 2		Dosificación 3	
	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido	Peso (gr)	% Absorbido
0	1925	0	1937	0	1942	0	1946	0
3	1813	0	1969	1.65	1972	1.54	1978	1.64
9	1284	0	1994	2.94	1979	1.91	1983	1.90
24	1233	0	2017	4.13	1995	2.73	1994	2.47
48	0	0	2037	5.16	2035	4.79	2028	4.21
120	0	0	2058	6.25	2060	6.08	2054	5.55

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.15 Influencia del Rocamix más cemento en la absorción del agua suelo

A-7-6



Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Se puede observar que las muestras que fueron estabilizadas con las distintas dosificaciones no sufren grandes cambios en su peso comparado con su peso inicial, aumentaron su peso pero mantuvieron su forma, su estructura durante un tiempo de 120 horas bajo la saturación en agua, el aumento en su peso en porcentaje fue aproximado entre un 6.25% hasta un 5.36%, logrando mantenerse estables las muestras, se verifico que solo las paredes se humedecieron, mientras que la muestra en estado natural logro permanecer estable hasta las 24 hrs, luego se destruyeron por completo lo cual no permitió su pesaje, pasado este tiempo.

La fuerte impermeabilización que realiza el producto se puede verificar en los resultados obtenidos, asegurando que las muestras estabilizadas no sufrieron expansiones mayores ante la presencia de agua.

4.3.5 Resultados de suelos estabilizados

TABLA 4.29 Resultados de los suelos estabilizados

Muestra		LL	IP	Densidad	CHO%	Clasific.	CBR
M-3	Natural	26.85	10.50	1.95	11.7	A-6	3.65
	Dosif. 1	26.26	9.24	1.98	10.8	A-6	10.03
	Dosif. 2	25.73	8.76	2.05	10.9	A-6	15.45
	Dosif. 3	25.50	8.42	2.06	10.27	A-6	19.68
	Dosif. 4	25.12	8.04	2.06	10.67	A-6	23.97
M-12	Natural	46.65	16.47	1.77	15.83	A-7-5	2.69
	Dosif. 1	45.90	14.98	1.80	15.79	A-7-5	9.32
	Dosif. 2	45.44	14.38	1.82	14.22	A-7-5	14.56
	Dosif. 3	45.24	14.03	1.84	14.11	A-7-5	18.99
	Dosif. 4	44.87	13.52	1.84	13.43	A-7-5	21.59
M-13	Natural	46.77	10.68	1.80	16.56	A-7-5	3.04
	Dosif. 1	46.36	9.91	1.84	16.12	A-7-5	9.89
	Dosif. 2	45.90	9.15	1.85	15.75	A-7-5	14.99
	Dosif. 3	45.74	8.88	1.87	15.48	A-7-5	19.41
	Dosif. 4	45.39	8.30	1.87	14.69	A-7-5	22.09
M-14	Natural	38.18	16.68	1.93	13.60	A-6	3.38
	Dosif. 1	37.56	14.81	1.94	13.38	A-6	10.14
	Dosif. 2	37.12	14.13	1.97	13.36	A-6	15.16
	Dosif. 3	36.91	13.64	1.99	13.23	A-6	19.60
	Dosif. 4	36.60	13.10	2.00	12.81	A-6	22.20
M-15	Natural	39.42	16.45	1.97	16.75	A-6	3.75
	Dosif. 1	38.95	14.81	1.99	15.62	A-6	10.41
	Dosif. 2	38.10	14.18	2.02	15.95	A-6	15.61
	Dosif. 3	37.82	13.75	2.05	15.59	A-6	19.53
	Dosif. 4	37.23	13.26	2.07	15.21	A-6	24.17
M-4	Natural	27.86	9.66	1.98	10.46	A-4	6.17
	Dosif. 1	26.55	8.41	1.98	9.66	A-4	11.19
	Dosif. 2	26.34	8.08	1.99	8.96	A-4	18.60
	Dosif. 3	26.00	7.72	2.02	9.08	A-4	24.16
	Dosif. 4	25.78	7.41	2.05	8.97	A-4	27.81
M-2	Natural	55.30	30.84	1.70	15.90	A-7-6	2.59
	Dosif. 1	53.07	27.99	1.72	15.79	A-7-6	9.07
	Dosif. 2	52.16	26.77	1.75	14.35	A-7-6	14.48
	Dosif. 3	51.63	26.08	1.76	14.04	A-7-6	18.87
	Dosif. 4	50.85	25.04	1.76	13.47	A-7-6	21.38

Fuente: Elaboración propia

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

4.4.1 Medidas de tendencia central

TABLA 4.30 Datos de CBR

Nº	CBR (X)
1	3.65
2	10.03
3	15.45
4	19.68
5	23.97
6	2.69
7	9.32
8	14.56
9	18.99
10	21.59
11	3.04
12	9.89
13	14.99
14	19.41
15	22.09
16	3.38
17	10.14
18	15.16
19	19.60
20	22.20
21	3.75
22	10.41
23	15.61
24	19.53
25	24.17

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

$$X = \frac{x_1 + x_2 \dots + x_n}{n}$$

$$x = 14.13$$

Mediana

$$Me = \frac{X_{n+1}}{2}$$

$$Me = 15.16$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 15.16 y el otro 50% están por debajo.

4.4.2 Medidas de dispersión

Rango

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

$$R = 24.17 - 2.69 = 21.48$$

Se puede observar que existe dispersión entre los datos, para que los datos sean más homogéneos los valores extremos deben ser más cercanos entre ellos.

Desviación media

$$DM = \frac{\sum |X_j - X_m|}{n}$$

$$DM = 6$$

El valor de 6 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

Varianza Poblacional

$$s^2 = \frac{\sum (X_j - X_m)^2}{N}$$

$$s^2 = 48.16$$

Varianza muestral

$$\sigma^2 = \frac{\sum(X_j - X_m)^2}{n - 1}$$

$$\sigma^2 = 50.16$$

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos del CBR.

Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

$$\sigma = \sqrt{50.16} = 7.08$$

Por tanto el error estándar es de 7.08, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{X_m} * 100$$

$$CV = (7.08 / 14.13) * 100 = 50.10 \%$$

Un coeficiente de variación elevado nos indica que hay una alta dispersión de datos de toda la serie de estudio.

4.4.3 Análisis estadístico por dosificación

Análisis estadístico de la dosificación 1

Media aritmética

TABLA 4.31 Datos de CBR en la dosificación 1

Nº	CBR (X)
1	10.03
2	9.32
3	9.89
4	10.14
5	10.41
6	11.19
7	9.07

Fuente: Elaboración propia

$$x = 10.01$$

Mediana

$$X = \frac{7 + 1}{2} = 4$$

$$Me = 10.14$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 10.14 y el otro 50% están por debajo.

Medidas de dispersión

Rango

$$R = 11.19 - 9.07 = 2.12$$

Se puede observar que existe poca dispersión entre los datos, por lo cual se puede decir que los resultados de la dosificación 1 tienen cierta similitud.

Desviación media

$$DM = 0.50$$

El valor de 0.50 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

Varianza Poblacional

$$S^2 = 0.42$$

Varianza muestral

$$\sigma^2 = 0.49$$

La varianza se interpreta como una medida de cuan diversos son los datos obtenidos del CBR.

Desviación estándar

$$\sigma = 0.70$$

Por tanto el error estándar es de 0.70, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Coefficiente de variación

$$CV = (0.70 / 10.01) * 100 = 7 \%$$

Un coeficiente de variación de 7% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 50% que recomienda la estadística.

Análisis estadístico de la dosificación 2

Media aritmética

TABLA 4.32 Datos de CBR en la dosificación 2

Nº	CBR (X)
1	15.45
2	14.56
3	14.99
4	15.16
5	15.61
6	18.6
7	14.48

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

$$x = 15.55$$

Mediana

$$Me = \frac{7 + 1}{2} = 4$$

$$Me = 15.16$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 15.16 y el otro 50% están por debajo.

Medidas de dispersión

Rango

$$R = 18.6 - 14.48 = 4.12$$

Se puede observar que existe poca dispersión entre los datos, por lo cual se puede decir que los resultados de la dosificación 2 tienen cierta similitud.

Desviación media

$$DM = 0.89$$

El valor de 0.89 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

Varianza Poblacional

$$S^2 = 1.70$$

Varianza muestral

$$\sigma^2 = 1.98$$

La varianza se interpreta como una medida de cuán diversos son los datos obtenidos del CBR.

Desviación estándar

$$\sigma = 1.41$$

Por tanto el error estándar es de 1.41, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Coefficiente de variación

$$CV = (1.41 / 15.55) * 100 = 9.06\%$$

Un coeficiente de variación de 9.06% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 50% que recomienda la estadística.

Análisis estadístico de la dosificación 3

Media aritmética

TABLA 4.33 Datos de CBR en la dosificación 3

Nº	CBR (X)
1	19.68
2	18.99
3	19.41
4	19.6
5	19.53
6	24.16
7	18.87

Fuente: Elaboración propia

$$\bar{x} = 20.03$$

Mediana

$$Me = \frac{7 + 1}{2} = 4$$

$$Me = 19.53$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 19.53 y el otro 50% están por debajo.

Medidas de dispersión

Rango

$$R = 24.16 - 18.87 = 5.29$$

Se puede observar que existe poca dispersión entre los datos, por lo cual se puede decir que los resultados de la dosificación 3 tienen cierta similitud.

Desviación media

$$DM = 1.18$$

El valor de 1.18 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

Varianza Poblacional

$$S^2 = 2.92$$

Varianza muestral

$$\sigma^2 = 3.40$$

La varianza se interpreta como una medida de cuán diversos son los datos obtenidos del CBR.

Desviación estándar

$$\sigma = 1.85$$

Por tanto el error estándar es de 1.85, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Coefficiente de variación

$$CV = (1.85 / 20.03) * 100 = 9.23\%$$

Un coeficiente de variación de 9.23% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 50% que recomienda la estadística.

Análisis estadístico de la dosificación 4

Media aritmética

TABLA 4.34 Datos de CBR en la dosificación 4

Nº	CBR (X)
1	23.97
2	21.59
3	22.09
4	22.2
5	24.17
6	27.81
7	21.38

Fuente: Elaboración propia

$$\bar{x} = 23.32$$

Mediana

$$Me = \frac{7 + 1}{2} = 4$$

$$Me = 22.2$$

Este valor nos indica que el 50% de los valores están por encima de 22.2 y el otro 50% están por debajo.

Medidas de dispersión

Rango

$$R = 27.81 - 21.38 = 6.43$$

Se puede observar que existe poca dispersión entre los datos, por lo cual se puede decir que los resultados de la dosificación 4 tienen cierta similitud.

Desviación media

$$DM = 1.72$$

El valor de 1.72 es un error promedio, este se refiere a la distancia promedio de dato a dato de toda la serie.

Varianza Poblacional

$$S^2 = 4.40$$

Varianza muestral

$$\sigma^2 = 5.14$$

La varianza se interpreta como una medida de cuán diversos son los datos obtenidos del CBR.

Desviación estándar

$$\sigma = 2.27$$

Por tanto el error estándar es de 2.27, este valor permite conocer la ubicación de nuestros datos con respecto a la media.

Coefficiente de variación

$$CV = (2.27 / 23.32) * 100 = 9.73\%$$

Un coeficiente de variación de 9.73% nos indica que existe una baja dispersión entre datos, por estar por debajo de 50% que recomienda la estadística.

- En la comparación de medias la hipótesis nula es que las medias son iguales en los tipos de clasificación A-6 y A-7-5

CBR

TABLA 4.35 Análisis de medias en los suelos A-6 A-7-5

Clasificación	Media	N	Desv. est	Min	Max	Error estándar de la media
A-6	14.45	15	7.25	3.38	24.17	1.87
A-7-5	13.65	10	7.18	2.69	22.09	2.27
Total	14.13	25	7.08	2.69	24.17	1.41

Fuente: Elaboración propia

De hecho la media de A-6 tiene un valor medio superior a A-7-5. Por tanto, nuestra hipótesis se centra en comprobar si el CBR es significativamente distinto en los dos grupos. Para responder a esta hipótesis recurrimos al análisis de la varianza de un factor y realizamos el contraste de igualdad de medias.

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 \quad vs \quad H_1 = \mu_1 \neq \mu_2$$

TABLA 4.36 Análisis de la varianza

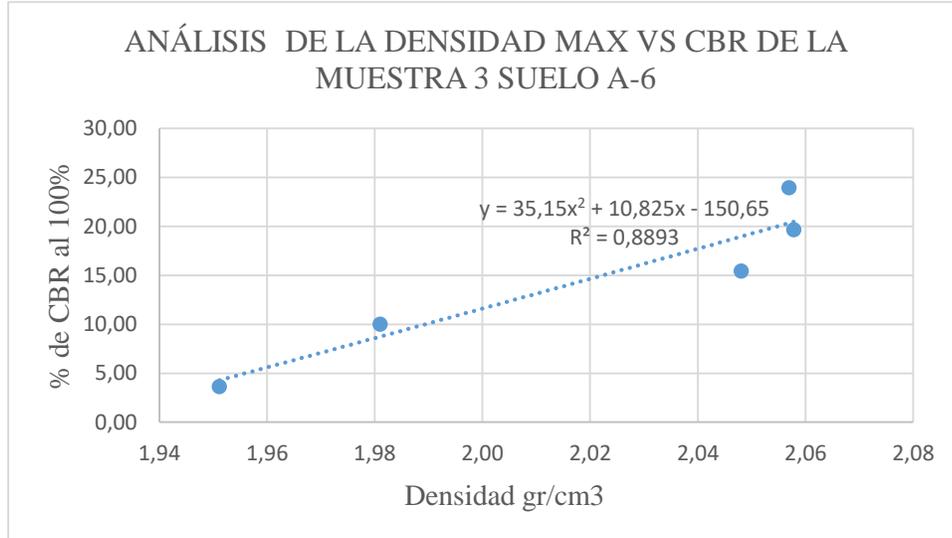
CBR	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3.82	1	3.82	0.073	0.78
Dentro de grupos	1201.011	23	52.21		
Total	1204.83	24			

Fuente: Elaboración propia

Si el valor de F es mayor que uno quiere decir que hay efectivo positivo del factor clasificación. Se observa que el P-valor (Sig) tiene un valor de 0.78, que es mayor que el nivel de significancia 0.05. Por lo tanto, hemos comprobado estadísticamente que los dos grupos son iguales. Es decir se puede rechazar la hipótesis alternativa que dice que al menos dos grupos son diferentes.

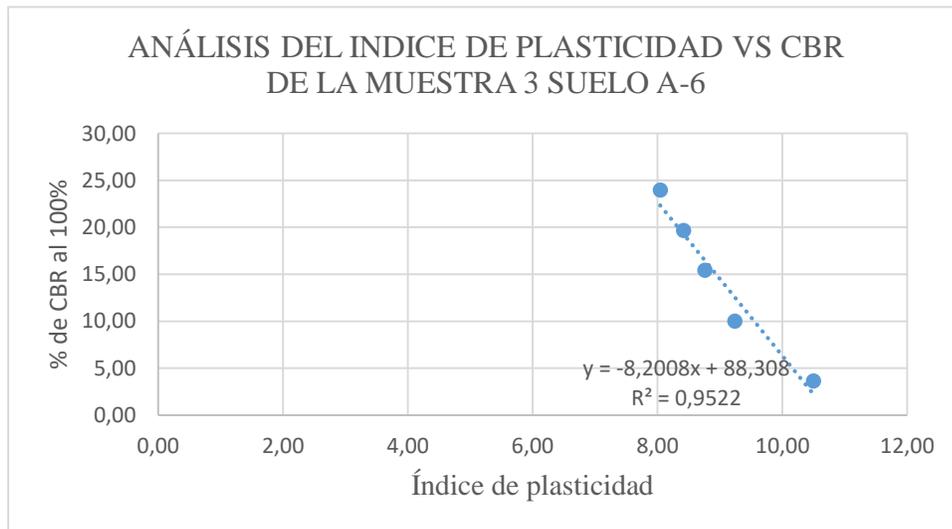
Análisis de resultados de la muestra 3 suelo A-6, barrio de aplicación torrecillas

Figura 4.16 Análisis de la densidad máx. vs CBR suelo A-6



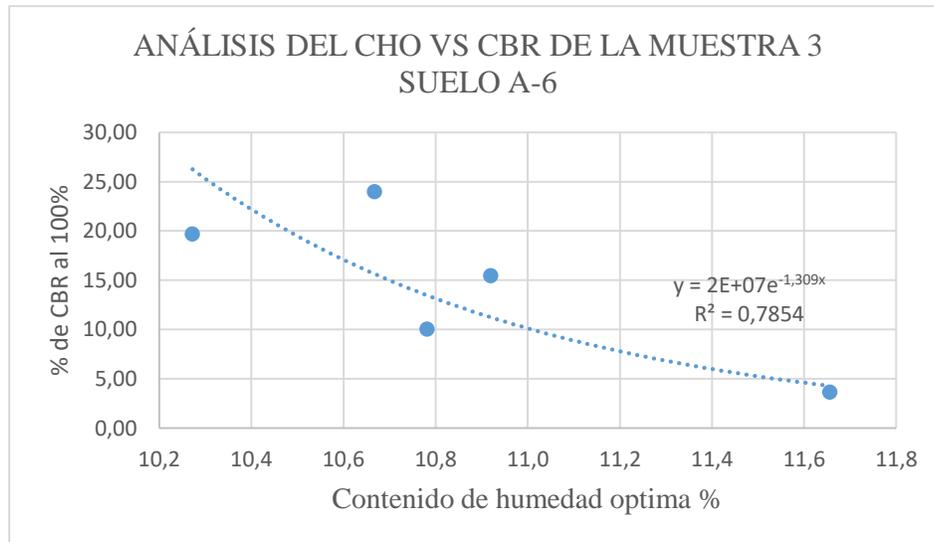
Observación: De la fig. 4.16 se puede analizar que el CBR en la muestra 3 extraída del barrio Torrecillas suelo A-6, aumenta a medida que la densidad lo hace cuando se añade al suelo % de Rocamix entre 0.023 a 0.036 y de cemento 0.77 y 2.31%, en la última dos dosificaciones la densidad se mantiene constante pero incrementando el CBR.

Figura 4.17 Análisis del índice de plasticidad vs CBR muestra 3 suelo A-6



Observación: De la fig. 4.17 se puede analizar que el CBR de muestra 3 del barrio de aplicación Torrecillas suelo A-6, aumenta a medida que el IP disminuye cuando se añade al suelo natural % de Rocamix entre 0.023 a 0.036 y de cemento 0.77 y 2.31%, de manera lineal existiendo la mejor correlación entre estos datos con más del 0.9.

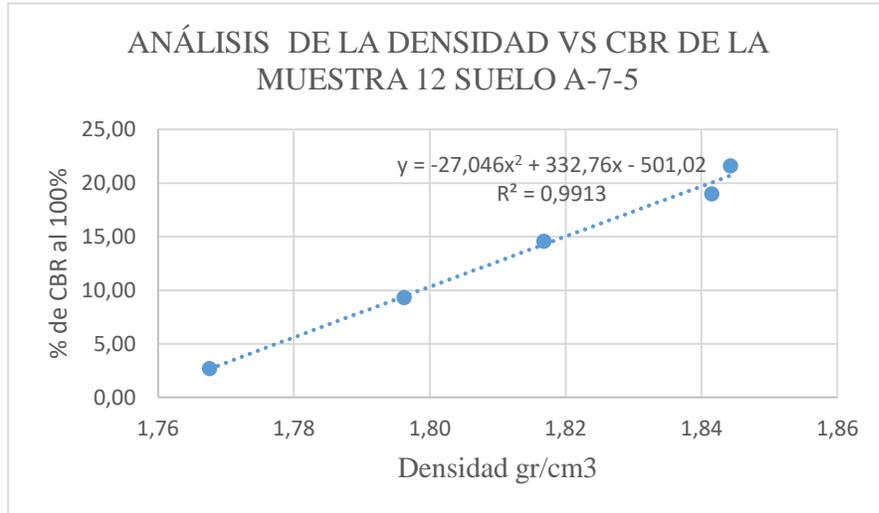
Figura 4.18 Análisis del CHO vs CBR muestra 3 suelos A-6



Observación: De la fig. 4.18 se observa que el CHO disminuye desde la 1era. Dosificación aplicada mientras que el CBR tiende a aumentar cuando el CHO reduce en la muestra 3 suelo A-6 del barrio Torrecillas.

Análisis de resultados de la muestra 12 suelo A-7-5, barrio de aplicación torrecillas

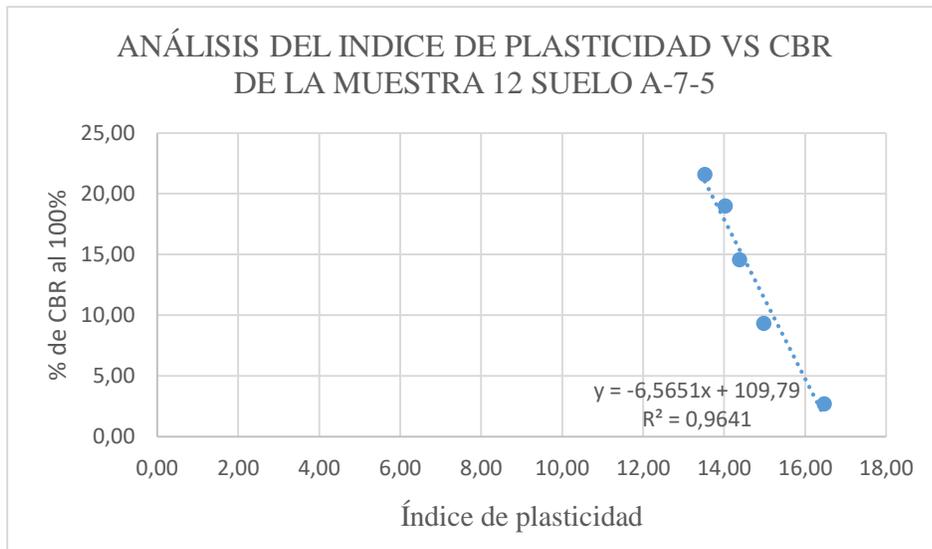
Figura 4.19 Análisis de la densidad máx. vs CBR suelo A-7-5



Fuente: Elaboración propia

Observación: De la fig. 4.19 se puede observar que el CBR se incrementa a igual que la densidad máxima lo hace, añadiéndole % de Rocamix de 0.026 a 0.041% y cemento de 0.88 a 2.65%, existiendo una correlación aceptable con más del 0.9 entre datos correspondiente a la muestra 12 del barrio Torrecillas en un suelo A-7-5.

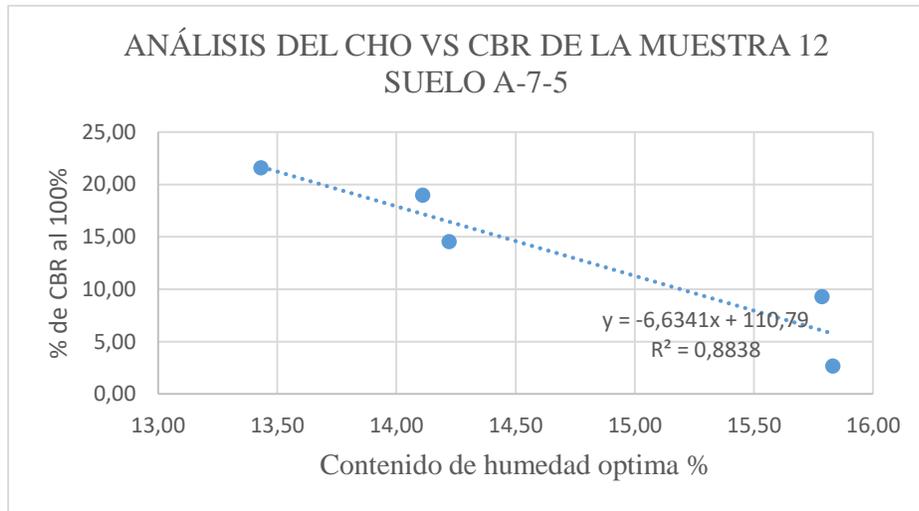
Figura 4.20 Análisis del índice de plasticidad vs CBR muestra 12 suelo A-7-5



Fuente: Elaboración propia

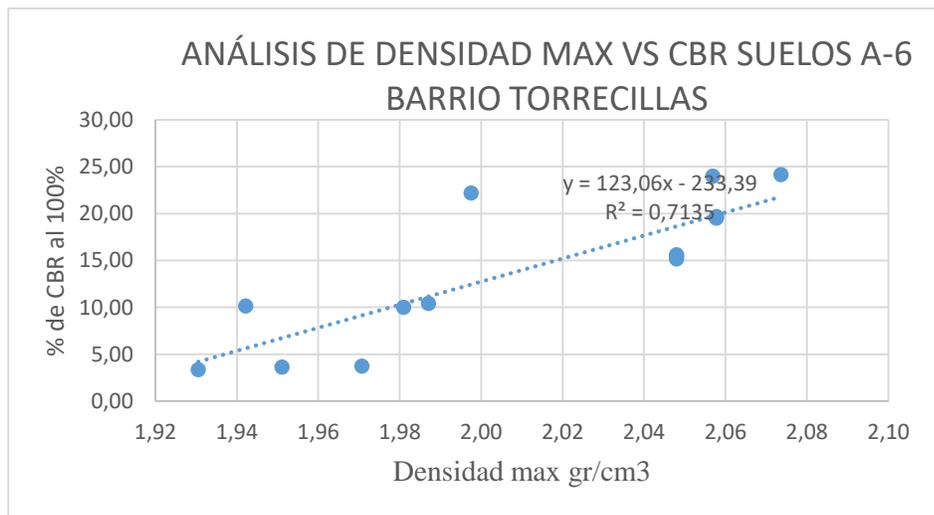
Observación: De la fig. 4.20 se puede observar que a medida que el IP del suelo disminuye el CBR se incrementa, ajustándose a una ecuación lineal, alcanzando una buena correlación entre estos datos con más del 0.9 en la muestra 12 extraída del barrio Torrecillas correspondiente a un suelo A-7-5.

Figura 4.21 Análisis del CHO vs CBR muestra 12 suelo A-7-5



Análisis de datos y resultados para suelos de la clasificación A-6 pertenecientes al barrio de aplicación Torrecillas.

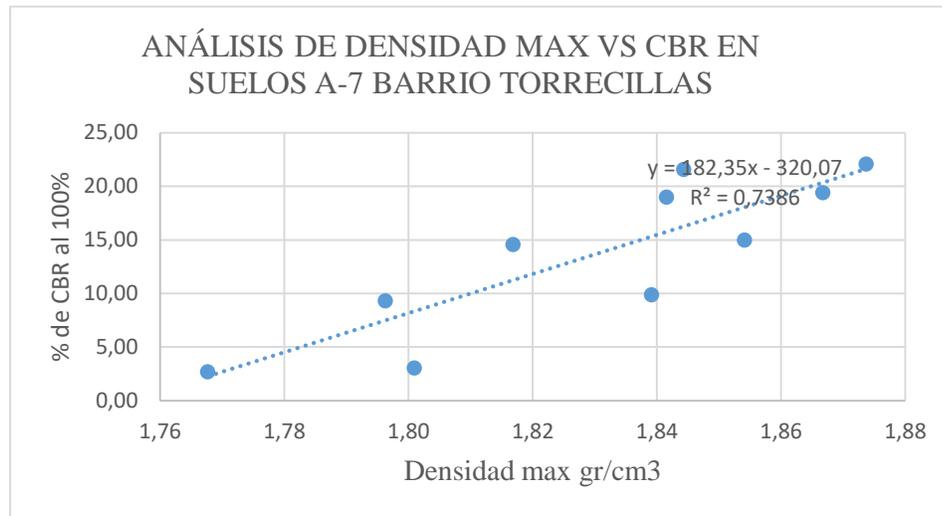
Figura 4.22 Análisis de la densidad vs CBR en suelos de la clasificación A-6



Fuente: Elaboración propia

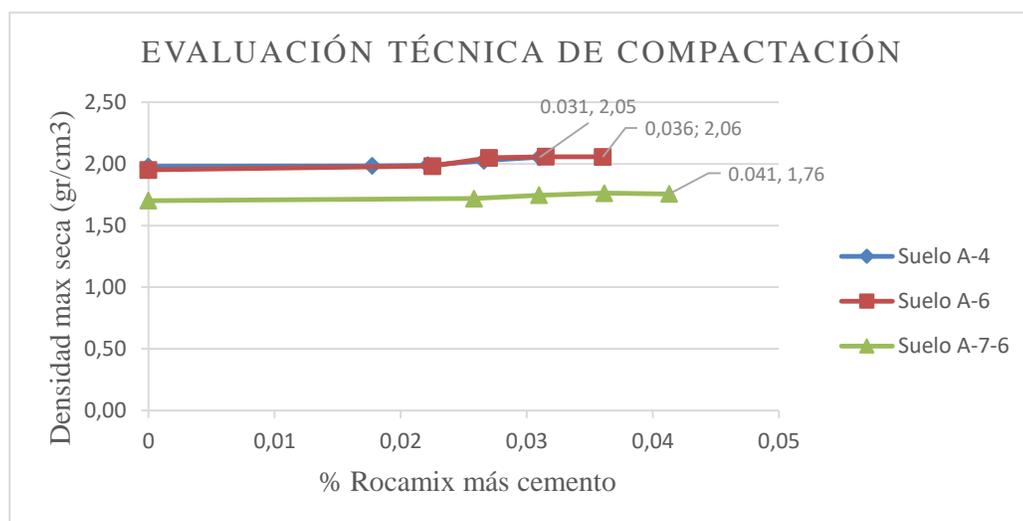
Observación: En la figura 4.22 se puede observar que las densidades máx. pasaron de un valor de 1.93 aproximadamente hasta un 2.07 gr/cm³ en muestras de suelos A-6, del barrio Torrecillas cuando se añadió % de Rocamix de 0.023 a 0.036% y cemento de 0.77 a 2.31%, logrando obtener en estos suelos valores de hasta 25% en CBR.

Figura 4.23 Análisis de la densidad vs CBR en suelos de la clasificación A-7



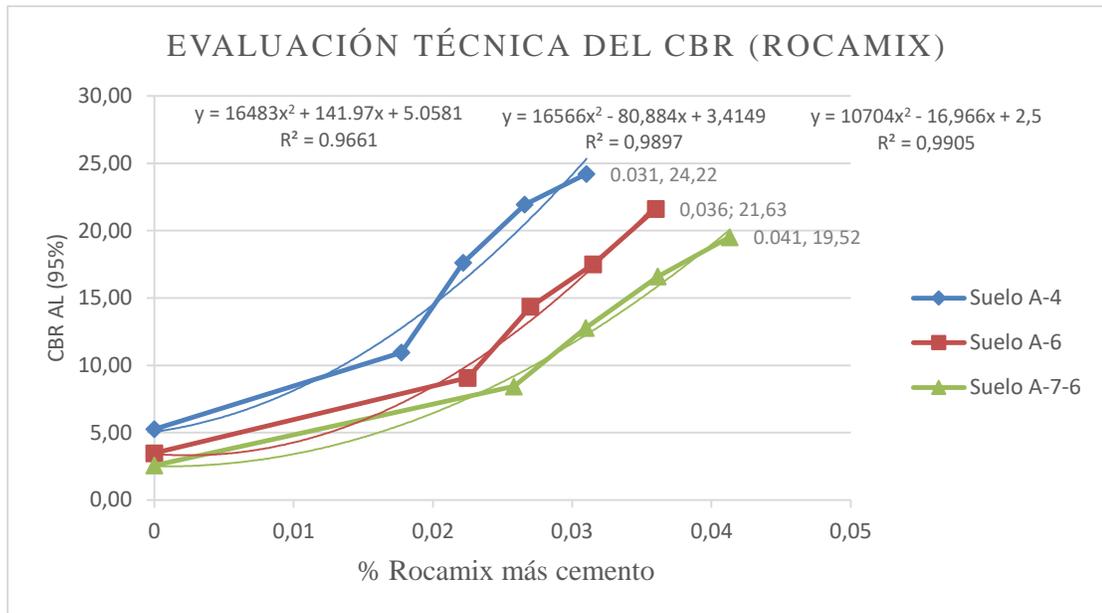
4.4.4 Análisis técnico de resultados

Figura 4.24 Evaluación técnica de la densidad máxima con distintos porcentajes de estabilizantes



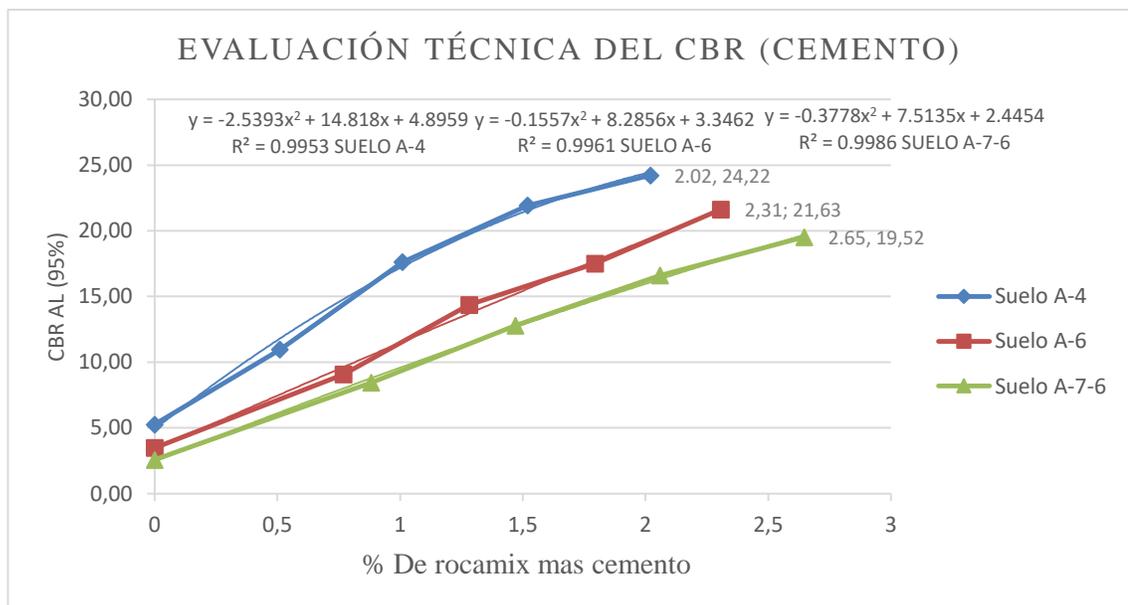
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.25 Evaluación técnica del CBR con distintos porcentajes de estabilizantes



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.26 Evaluación técnica del CBR con distintos porcentajes de estabilizantes



Fuente: Elaboración propia

Observación: En la figura 4.25 evaluación del CBR vs % de Rocamix mas cemento en distintos suelos, se puede observar que a medidas que las concentraciones de Rocamix más cemento que desde 0.018 a 0.041% (Rocamix), y 0.51 a 2.65% (cemento) aumentan los CBR también incrementan su valor, existiendo una buena correlación de más de 0.9 en los distintos suelos, se aprecia que desde la primera dosificación añadida los CBR tienden a subir, aun estando esta dosificación por debajo de la que recomienda la empresa Rocamix.

Se presentan ecuaciones de porcentajes de estabilizantes vs CBR para tres muestras de clasificaciones distintas, todas las ecuaciones tienen una correlación aceptable.

– Ecuación para calcular el % de **Rocamix** en un suelo A-4.

Refiérase a la figura 4.25 CBR al 95% vs % de Rocamix

$$\text{CBR (95\%)} = 16483 (\% r)^2 + 141.97 (\%r) + 5.0581 \quad \text{Ecuación 4.1}$$
$$R^2 = 0.9661$$

Dónde: CBR (95%)= CBR al 95% en un suelo A-4

%r= % de Rocamix suelo A-4

– Ecuación para calcular el % de **cemento** en un suelo A-4.

Refiérase a la figura 4.26 CBR al 95% vs % de cemento

$$\text{CBR (95\%)} = -2.5393 (\%c)^2 + 14.818 (\%c) + 4.8959 \quad \text{Ecuación 4.2}$$
$$R^2 = 0.9953$$

Dónde: CBR (95%)= CBR al 95% en un suelo A-4

%c= % de cemento suelo A-4

– Ecuación para calcular el % de **Rocamix** en un suelo A-6

Refiérase a la figura 4.25 CBR al 95% vs % de Rocamix

$$\text{CBR (95\%)} = 16566 (\%r)^2 - 80.884 (\%r) + 3.4149 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$R^2 = 0.9897$$

Dónde: CBR (95%)= CBR al 95% en un suelo A-6

%c= % de Rocamix suelo A-6

– Ecuación para calcular el % de **cimento** en un suelo A-6.

Refiérase a la figura 4.26 CBR al 95% vs % de cemento

$$\text{CBR (95\%)} = -0.1557 (\%c)^2 + 8.2856 (\%c) + 3.3462 \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$$R^2 = 0.9961$$

Dónde: CBR (95%)= CBR al 95% en un suelo A-6

%c= % de cemento suelo A-6

– Ecuación para calcular el % de **Rocamix** en un suelo A-7-6

Refiérase a la figura 4.25 CBR al 95% vs % de Rocamix

$$\text{CBR (95\%)} = 10704 (\%r)^2 - 16.966 (\%r) + 2.5 \quad \text{Ecuación 4.5}$$

$$R^2 = 0.9905$$

Dónde: CBR (95%)= CBR al 95% en un suelo A-7-6

%c= % de Rocamix suelo A-7-6

– Ecuación para calcular el % de **cimento** en un suelo A-7-6.

Refiérase a la figura 4.26 CBR al 95% vs % de cemento

$$\text{CBR (95\%)} = -0.3778 (\%c)^2 + 7.5135 (\%c) + 2.4454 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

$$R^2 = 0.9986$$

Dónde: CBR (95%)= CBR al 95% en un suelo A-7-6

%c= % de cemento suelo A-7-6

- Al evaluar el ensayo de compactación se determina que la mezcla de suelo con distintas proporciones de Rocamix más cemento con el suelo natural, se logra alcanzar densidades mayores a la natural en cualquier dosificación establecida, aumentado este valor entre un 3 % hasta un 6 % respecto a la natural. Así mismo se verifica que la humedad óptima disminuye, pero en una proporción mínima comparada con la humedad óptima del suelo natural, estando casi cerca a este valor.
- Se concluye que en las muestras de suelo seleccionadas para aplicar la tecnología Rocamix, mezcladas con las distintas proporciones de estabilizantes influyen de manera favorable en la expansión disminuyendo en todos los casos registrando valores por debajo de 1, esto influye directamente en el cambio volumétrico que sufriría nuestro suelo al estar sometida a saturación de agua.
- Así también se determina que las muestras estabilizadas alcanzan valores relativamente altos en el índice soporte de california CBR, tanto al 100% y al 95%, registrando valores de CBR altos en las muestras que fueron sometidas al proceso de estabilización, sobrepasando a las exigencias que requiere la norma de la ABC para suelos en subrasantes.

4.5 DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN ÓPTIMA (ROCAMIX MÁS CEMENTO)

Se determinará el contenido óptimo de Rocamix más cemento al valor que proporcione un CBR mayor o igual a 4%, teniendo en cuenta que este es el valor mínimo que deber tener un suelo como para ser utilizado en subrasantes según especificaciones locales de la ABC, tomando en cuenta también que este debe cumplir con el valor máximo en expansión que es del 3%.

También se consideró para seleccionar el valor óptimo que los CBR de las muestras tengan características técnicas de una subrasante buena, siendo el valor mínimo de 8%, según la tabla 3.17 de la clasificación de la subrasante (AASHTO), detallada en el capítulo III.

Según los resultados obtenidos en esta investigación todas las proporciones añadidas al suelo en cuanto a Rocamix más cemento portland, alcanzan resultados óptimos que sobrepasan a valor que exige la norma en cuanto a CBR, llegando a seleccionar como mejor alternativa la dosificación con menor cantidad respecto a Rocamix más cemento, lo cual garantiza necesitar menor cantidad de material de estos componentes, y por ende un menor costo para estabilizar un m³ de tierra de cualquier clasificación.

TABLA 4.37 Contenido óptimo de Rocamix más cemento suelo A-4

Componente	Cantidad	Unidad
Rocamix	0.018	%
Cemento	0.51	%

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.38 Contenido óptimo de Rocamix más cemento suelo A-6

Componente	Cantidad	Unidad
Rocamix	0.023	%
Cemento	0.77	%

Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.39 Contenido óptimo de Rocamix más cemento suelo A-7-6

Componente	Cantidad	Unidad
Rocamix	0.026	%
Cemento	0.88	%

Fuente: Elaboración propia

4.6 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS REFERENCIALES

El estudio de costos contempla básicamente la elaboración de precios referenciales, los cuales corresponden a tres alternativas de suelos de distinta clasificación de estabilización con métodos de construcción tradicionales y adecuados a la maquinaria con la que se cuenta en nuestro medio para la aplicación de este proceso. En el proceso de estabilización, se emplean equipos comunes de construcción de una subrasante, como ser: motoniveladora, camión aguatero y compactadores también se emplea un tractor agrícola, lo cual incidirán en los costos de construcción de estas

Para realizar el cálculo de los costos que implicaría la estabilización en cada suelo se hizo un análisis detallado de los precios unitarios, tomando en cuenta los costos horarios y rendimientos de operación de la maquinaria que se empleará asimismo en los insumos, materiales, mano de obra y demás gastos que demanda la obra o actividad.

A continuación se hace una descripción de los componentes del precio de esta actividad.

4.6.1 Costos Directos

– Materiales estabilizantes

Se considera en la estabilización dos materiales para lograr la tarea o el objetivo propuesto como son: el producto Rocamix, y el cemento.

El producto Rocamix será importado directo desde el país donde se encuentra la fábrica de la empresa.

El cemento se obtiene de la cotización en diferentes puntos de distribución pero esto al por mayor con el fin de economizar los costos. Asimismo, el rendimiento de estos estabilizantes será obtenido del manual de aplicación de la tecnología Rocamix.

– Mano de obra

Comprende el haber básico del trabajador, el pago de beneficios sociales, el pago de impuestos y el costo horario de la mano de obra.

Los haberes o salarios mensuales se consideran de acuerdo a los establecidos por la CADECO pero su variación está sujeta a la ley de la libre oferta y demanda. Asimismo en el detalle de los precios unitarios no se consideran al operador del equipo más un ayudante o peón dentro de los costos horarios de operación de la maquinaria, por lo que estos son considerados recién en los gastos de la mano de obra dentro de análisis.

- Maquinaria y equipo.

Contempla la productividad, costos de propiedad, vida útil, amortización e intereses, costos de operación reparación y repuestos, en fin esto se resume en lo que son los costos horarios de operación los que afectados por el rendimiento de la maquinaria, nos dará el costo unitario de la maquinaria.

4.6.2 Costos indirectos

Por una parte, están los gastos generales, que pueden estimarse en función de los costos unitarios y como el 10% de costo directo.

Ahora como en toda obra se debe obtener utilidades las cuales también se pueden estimar a partir de los costos directos pudiendo ser el 7% de estos costos.

4.6.3 Precios unitarios de las estabilizaciones.

En base a todos los conceptos establecidos en las secciones anteriores se elaboran las planillas de precios unitarios de cada suelo establecidos para investigar en este trabajo.

TABLA 4.40 Resultados de precios unitarios para estabilizaciones a cantidad optimas de Rocamix y cemento

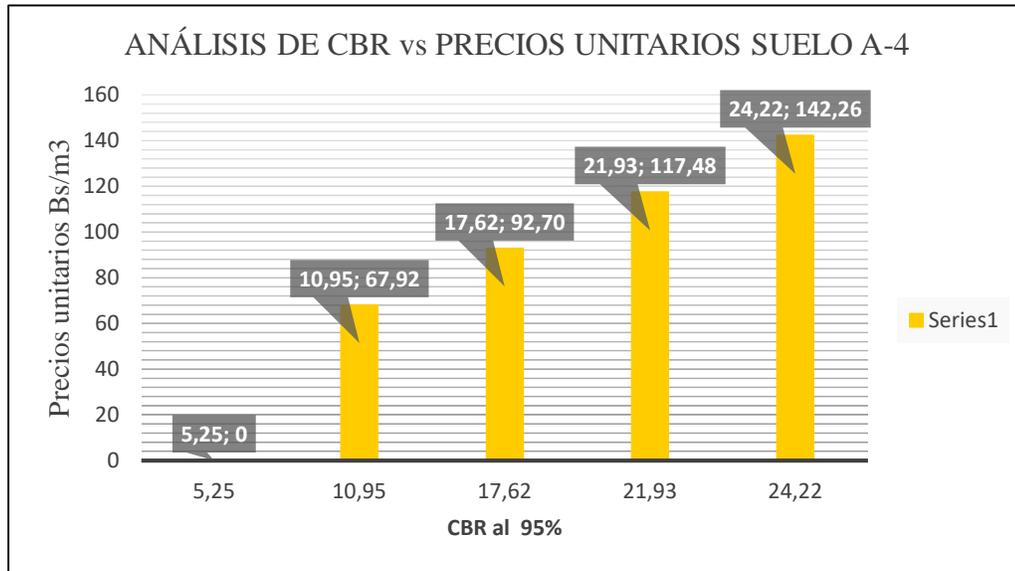
Ítem. O actividad	Costo total \$u\$/m ³	Costo total Bs/m ³
Estabilización suelo A-4 0.018% r y 0.51% c	9.74	67.92
Estabilización suelo A-6 0.023% r y 0.77% c	12.27	85.51
Estabilización suelo A-7-6 0.026% r y 0.88% c	12.27	85.51

Fuente: Elaboración propia

4.6.4 Análisis de precios unitarios por suelo

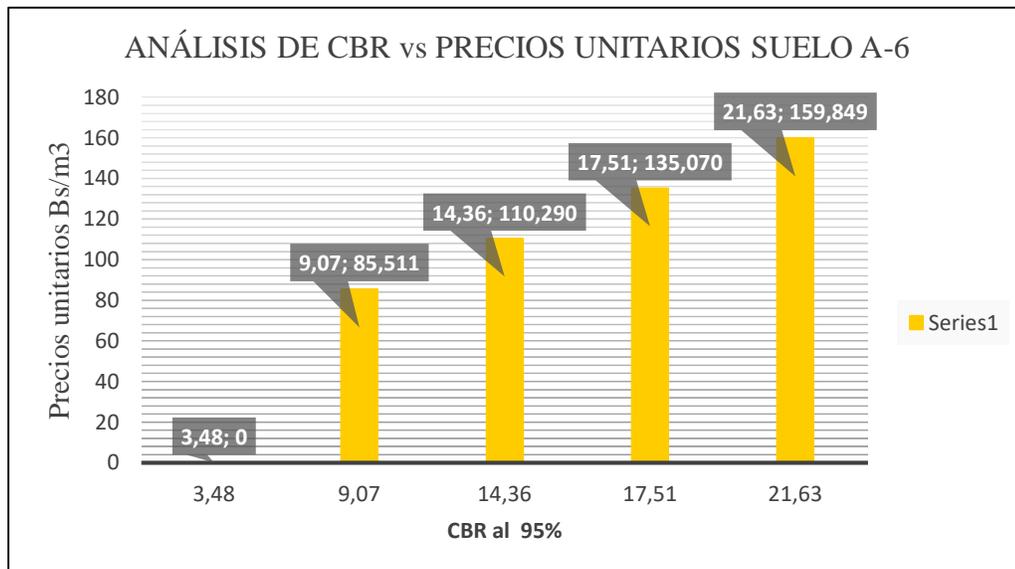
En las siguientes gráficas se harán un análisis de CBR vs precios unitarios en muestras de suelos de distintas clasificaciones.

Figura 4.27 Análisis de CBR vs precios unitarios por m³ en un suelo A-4



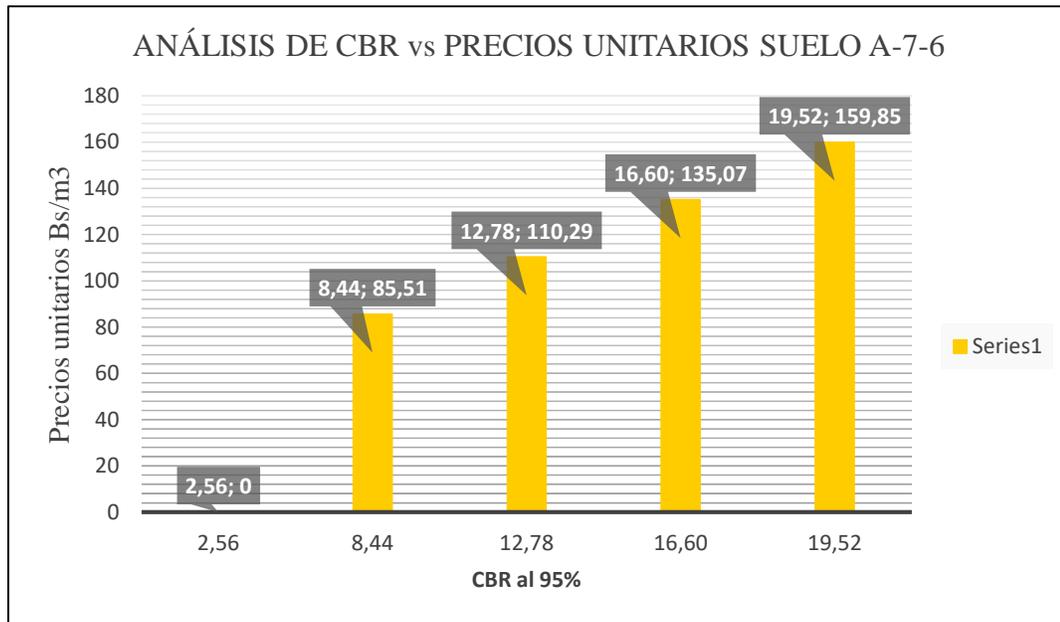
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.28 Análisis de CBR vs precios unitarios por m³ en un suelo A-6



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.29 Análisis de CBR vs precios unitarios por m3 en un suelo A-7-6



Fuente: Elaboración propia

4.7 RESULTADOS OBTENIDOS

4.7.1 Resultados alcanzados por los estabilizantes óptimos analizados

TABLA 4.41 Resumen de resultados obtenidos por los valores óptimos de cada estabilizante analizado

Propiedad	Ensayo	Estabilizante analizado		
		Suelo A-4	Suelo A-6	Suelo A-7-6
Porcentaje óptimo de estabilizante	Rocamix	0.018	0.023	0.026
	Cemento	0.51	0.77	0.88
Compactación	Humedad optima %	9.7	10.78	15.79
	Densidad máxima (gr/cm3)	1.98	1.98	1.72
Cambio volumétrico	Expansión %	0.30	0.37	0.46

Capacidad de soporte	CBR al 100%	11.19	10.03	9.07
	CBR al 95%	10.95	9.07	8.44
Plasticidad	IP	8.41	9.24	27.99
Impermeabilidad	Absorción capilar	6.11	6.18	6.25
Costo de estabilización por m ³		67.92	85.51	85.51

Fuente: Elaboración propia

4.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE TIEMPO Y COSTO DE LA ESTABILIZACIÓN CON ROCAMIX MÁS CEMENTO CON LA ESTABILIZACIÓN CON CAL Y CEMENTO

4.8.1 Análisis comparativo de costo

El análisis siguiente tiene el propósito de comparar la estabilización que se realizó en este trabajo con el sistema Rocamix más cemento que es nuevo en Tarija, con métodos tradicionales que se ya realizaron en el departamento como lo son la estabilización con cal y cemento. Llevar a una comparación en tiempo y costos entre estas alternativas para mejorar la calidad de suelos arcillosos.

Los datos de la cantidad respecto al % de estabilizante en una estabilización tanto de cemento como de cal, para estabilizar un m³ de suelo, fueron tomados del trabajo de investigación “Estudio de alternativas para la estabilización de subrasante de la zona del barrio el constructor”, realizado en Tarija.

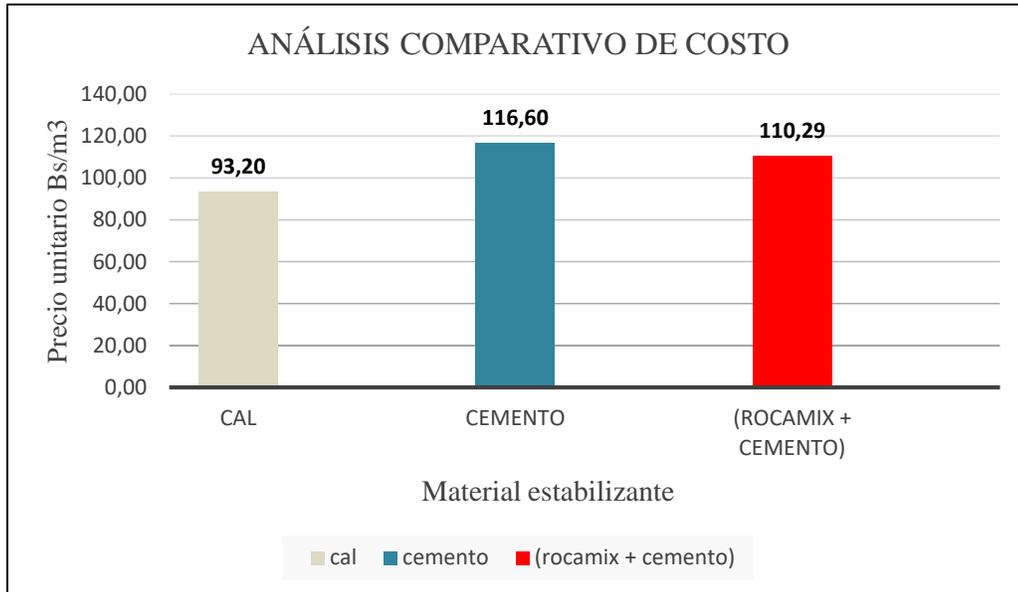
TABLA 4.42 Cantidad y precio de material para estabilizar un m³ de suelo A-6

Estabilización de un m ³ de suelo A-6			
Suelo A-6	cal	cemento	(Rocamix + cemento)
Porcentaje (%)	4.8	4	0.027 r y 1.28% de c
Precio unitario (Bs)	93.20	116.60	110.29

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se realiza una comparación entre alternativas de vs precios unitarios para estabilizar un m3 de suelo A-6.

Figura 4.30 Análisis comparativo de costos de alternativas de estabilizaciones



Fuente: Elaboración propia

4.8.2 Análisis comparativo de tiempo

El análisis comparativo de tiempo está referido al tiempo que tomara realizar la construcción de un m³ de una subrasante estabilizada, con distintas alternativas entre métodos tradicionales y el que se desarrolló en este trabajo de investigación como lo es el sistema Rocamix más cemento.

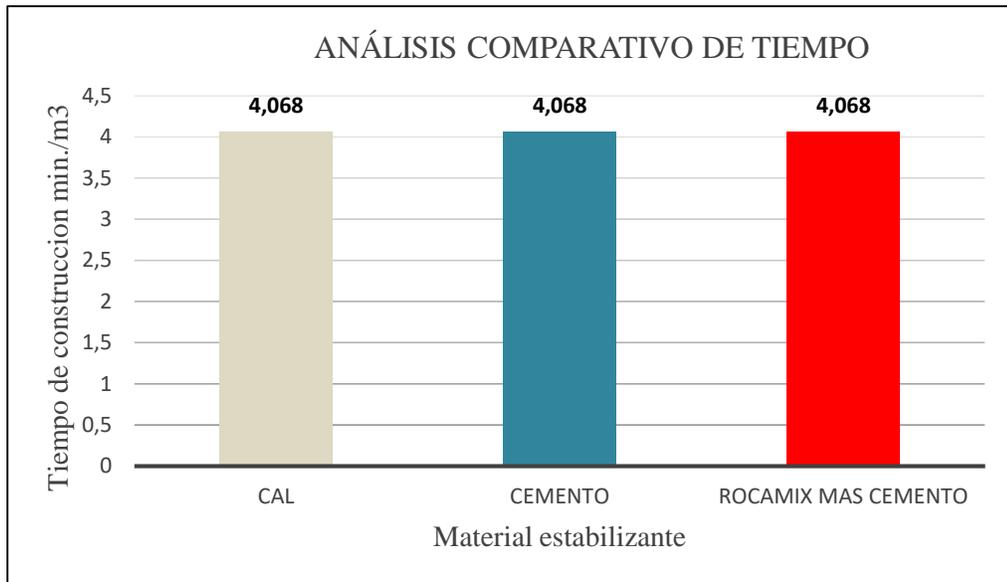
En la siguiente tabla se muestra un detalle del cronograma de tiempo que llevara construir una subrasante estabilizada con distintas alternativas entre nuevas y otras tradicionales o conocidas con lo son la estabilización con cal y cemento.

TABLA 4.43 Análisis de tiempo de construcción de una subrasante estabilizada

N°	Descripción Ítem	Unidad	Cantidad	Rendimiento		N° Cuadrilla	Tiempo Parcial		Duración P/Cronograma
				Unitario	Parcial		Hrs/Dia Jornal	Sub Parcial	
1	Subrasante estabilizada con cal	m ³	1.00	0.0226	0.02	1.00	8.00	0.00283	1.00
2	Subrasante estabilizada con cemento	m ³	1.00	0.0226	0.02	1.00	8.00	0.00283	1.00
3	Subrasante estabilizada con Rocamix más cemento	m ³	1.00	0.0226	0.02	1.00	8.00	0.00283	1.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.31 Análisis comparativo de tiempo de alternativas de estabilizaciones



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

A la finalización del presente trabajo, de aplicación de una nueva tecnología llamado sistema Rocamix líquido, para la estabilización de suelos, que busca incrementar la resistencia de los mismos, para acondicionarlos mejorarlos, y puedan ser utilizados en alguna obra más específicamente en carreteras, aunque esta tecnología ofrece varios beneficios en otras áreas, y fundamentando los resultados arrojados de un análisis técnico a la incorporación de varias dosificaciones, para encontrar la más óptima, se puede enunciar las conclusiones más importantes que genera esta investigación.

Para el desarrollo del estudio, se vio la necesidad de obtener varias muestras de suelos que nos representen la diversidad que tenemos en el medio local, para que este estudio tenga un mayor alcance en cuanto a la diversidad de suelos que podemos encontrarse cuando se esté construyendo una obra.

Para la cual se hizo el levantamiento de varias muestras de distintos puntos en diferentes barrios de la ciudad de Tarija, y llevadas al laboratorio para la realización de los ensayos de humedad, granulometría, plasticidad y finalmente poder clasificar nuestras muestras y seleccionar aquellas que sean las más representativas para aplicar todo el proceso que se tenía previsto en esta investigación, de las muestras extraídas se tiene la siguiente clasificación de acuerdo a la AASHTO.

La investigación se aplicó sobre muestras del barrio Torrecillas, y para apoyar la investigación se seleccionó como referencia las siguientes: muestra 4 A-4 (7), clasificado como suelo limoso, y la muestra 2 A-7-6 (19), clasificado como suelo arcilloso.

Con los ensayos que se efectuaron en el laboratorio y los resultados expuestos en el capítulo III, se puede concluir que el suelo en su estado natural no cumple con las especificaciones técnicas mínimas como para ser utilizado en una subrasante,

determinando de esa manera que será necesario un proceso como estabilización para mejorar las propiedades del suelo.

TABLA 5.1 Clasificación de muestras de suelos

Suelo natural	Clasificación AASHTO	Nombre del suelo
Muestra 1	A-6(10)	suelo arcilloso
Muestra 2	A-7-6(19)	suelo arcilloso
Muestra 3	A-6(8)	suelo arcilloso
Muestra 4	A-4(7)	suelo limoso
Muestra 5	A-7-6(13)	suelo arcilloso
Muestra 6	A-6(9)	suelo arcilloso
Muestra 7	A-7-6(17)	suelo arcilloso
Muestra 8	A-4(8)	suelo limoso
Muestra 9	A-4(7)	suelo limoso
Muestra 10	A-7-6(12)	suelo arcilloso
Muestra 11	A-6(11)	suelo arcilloso
Muestra 12	A-7-5(12)	suelo arcilloso
Muestra 13	A-7-5(10)	suelo arcilloso
Muestra 14	A-6(11)	suelo arcilloso
Muestra 15	A-6(10)	suelo arcilloso
Muestra 16	A-7-5(10)	suelo arcilloso
Muestra 17	A-4(8)	suelo limoso
Muestra 18	A-6(9)	suelo arcilloso
Muestra 19	A-6(8)	suelo arcilloso
Muestra 20	A-4(8)	suelo limoso
Muestra 21	A-7-6(17)	suelo arcilloso
Muestra 22	A-6(10)	suelo arcilloso

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis técnico, de las alternativas de dosificaciones que se le agregaron a las muestras se determinaron los porcentajes óptimos de cada estabilizante, es decir las cantidades de Rocamix líquido más cemento.

TABLA 5.2 Resumen de resultados obtenidos por los valores óptimos de cada estabilizante analizado

Propiedad	Ensayo	Suelos analizados		
		Suelo A-4	Suelo A-6	Suelo A-7-6
Porcentaje óptimo de estabilizante	Rocamix	0.018	0.023	0.026
	Cemento	0.51	0.77	0.88
Cantidad	Rocamix (l/m ³)	0.40	0.50	0.50
	cemento (kg/m ³)	10.00	15.00	15.00
Compactación	Humedad óptima %	9.66	10.78	15.79
	Densidad máxima (gr/cm ³)	1.98	1.98	1.72
Cambio volumétrico	Expansión %	0.30	0.37	0.46
Capacidad de soporte	CBR al 100%	11.19	10.03	9.07
	CBR al 95%	10.95	9.07	8.44
Plasticidad	IP	8.41	9.24	27.99
Impermeabilidad	Absorción capilar	6.11	6.18	6.25
Costo de estabilización por m ³		67.92	85.51	85.51

Fuente: Elaboración propia

Mediante un análisis de los resultados alcanzados se mencionará las siguientes conclusiones técnicas:

En los ensayos de límites de consistencia se puede concluir con lo siguiente:

Como porcentajes mínimos de Rocamix más cemento influyen de manera favorable en el índice de plasticidad respecto al natural, que es un indicador directo de las propiedades expansivas de los suelos analizados.

En las muestras analizadas se verifica que al añadirle distintas dosificaciones de estabilizante el límite líquido disminuye respecto al natural, mientras que el límite plástico aumenta, es decir acercando las fronteras entre estos dos límites, por ende, una disminución en el IP de las muestras analizadas.

Se determina que a través de las curvas de porcentaje de cemento con Rocamix vs el índice de plasticidad que a medida que las concentraciones de estabilizantes aumentan el índice de plasticidad disminuye de manera considerable.

En el ensayo de compactación se observa que las proporciones añadidas al suelo de estabilizantes de Rocamix más cemento aumentan la densidad seca máxima, respecto a la natural en un porcentaje de 3 hasta el 6%, mientras que la humedad óptima disminuye, pero muy poco estando sus valores cerca a la del suelo natural, el suelo que más incremento su densidad máxima fue la muestra M-3 suelo A-6 del barrio Torrecillas en un 5.94% respecto a la natural.

Con el dato de la humedad óptima se procedió a realizar los ensayos de CBR, fundamentales para nuestro estudio que será la principal propiedad a mejorar en esta investigación.

Se procedió a determinar los CBR tanto al 100% y al 95%, siendo este último el valor óptimo de campo, a los diferentes porcentajes tanto de Rocamix más cemento, llegando a las siguientes conclusiones:

Se verifica que a bajos porcentajes de Rocamix entre 0.018% hasta un 0.041%, y porcentajes de cemento entre un 0.51% hasta un 2.65%, aumentan considerablemente el valor de CBR en un 361% hasta un 663%.

En la expansión se observa que a pequeñas cantidades de Rocamix más cemento el valor disminuye de manera importante registrando valores en todos suelos por debajo del 1%, esto producto de la fuerte impermeabilización que realiza el producto a una muestra de suelo.

En el ensayo de absorción capilar se verifica en todos los casos de dosificaciones que las muestras permanecen estables durante un periodo de 120 hrs bajo la saturación en agua, incrementado su porcentaje de peso entre 6.25 y 5.36%.

Según la hipótesis las cantidades óptimas determinadas de Rocamix y cemento, permitirán que los suelos arcillosos puedan cumplir con especificaciones para subrasantes según la normativa de la ABC, verificando esto con los resultados alcanzados de CBR que sobrepasaron al valor mínimo requerido por la normativa.

Estadísticamente la primera dosificación es la más adecuada ya que la misma presenta la menor desviación estándar de las cuatro dosificaciones, es decir que los resultados de CBR presentan menor dispersión respecto a la media estando los datos más agrupados.

Las siguientes ecuaciones propuestas sirven para determinar las cantidades de Rocamix más cemento en el cálculo del CBR necesario en la construcción de una subrasante.

- Ecuación para calcular el % de **Rocamix** en un suelo A-4.

$$\text{CBR (95\%)} = 16483 (\% r)^2 + 141.97 (\%r) + 5.0581$$
$$R^2 = 0.9661$$

- Ecuación para calcular el % de **cemento** en un suelo A-4.

$$\text{CBR (95\%)} = -2.5393 (\%c)^2 + 14.818 (\%c) + 4.8959$$
$$R^2 = 0.9953$$

- Ecuación para calcular el % de **Rocamix** en un suelo A-6

$$\text{CBR (95\%)} = 16566 (\%r)^2 - 80.884 (\%r) + 3.4149$$
$$R^2 = 0.9897$$

- Ecuación para calcular el % de **cemento** en un suelo A-6.

$$\text{CBR (95\%)} = -0.1557 (\%c)^2 + 8.2856 (\%c) + 3.3462$$
$$R^2 = 0.9961$$

- Ecuación para calcular el % de **Rocamix** en un suelo A-7-6

$$\text{CBR (95\%)} = 10704 (\%r)^2 - 16.966 (\%r) + 2.5$$
$$R^2 = 0.9905$$

- Ecuación para calcular el % de **cemento** en un suelo A-7-6.

$$\text{CBR (95\%)} = -0.3778 (\%c)^2 + 7.5135 (\%c) + 2.4454$$
$$R^2 = 0.9986$$

5.2 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que se hacen mencion tienen el propósito de contribuir a los problemas que representa el mejoramiento de suelos, a través de una estabilización química, en este caso con la nueva tecnología Rocamix.

La estabilización con la nueva tecnología Rocamix, que implica una estabilización del tipo química, debe ser considerada para trabajar con cualquier tipo de suelo, ya que la misma trabaja perfectamente con cualquier clasificación de suelos, no presentando limitantes mayores, y además contribuye a mejorar sus propiedades manteniéndolas estables durante la vida útil de la obra.

Se tiene que tener en cuenta que cuando los suelos no cumplan con el teorema Rocamix estos no responderán de la mejor manera al tratamiento con el aditivo, por lo que se recomienda agregar un porcentaje de 3 a 5% de arcilla, y volver a realizar ensayos para determinar las dosis a añadir.

El tiempo máximo de almacenamiento del producto no debe superar 2.5 años después de la entrega por la empresa Rocamix.

Se recomienda estabilizar las muestras con los porcentajes óptimos, por las siguientes características:

- SUELO A-4

Aumento de la densidad máxima seca de 1.98 a 2.05 gr/cm³

Aumento del CBR al 95% de 5.25 a 24.216%

Reducción de la expansión de 2.07 a 0.21%.

– SUELO A-6

Aumento de la densidad máxima seca de 1.95 a 2.06 gr/cm³

Aumento del CBR al 95% de 3.48 a 21.63%

Reducción de la expansión de 3.26 a 0.26%.

– SUELO A-7-6

Aumento de la densidad máxima seca de 1.70 a 1.76 gr/cm³

Aumento del CBR al 95% de 2.56 a 19.52%

Reducción de la expansión de 3.64 a 0.35