

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



## **PROGRAMA DE MAESTRIA**

### **MENCIÓN: INGENIERÍA Y GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN**

### **TESIS**

#### **EFFECTO DEL ADITIVO TERRAZYME EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS DE SUBRASANTES EN LA ZONA DE EXPANSION DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA**

Para optar el Grado Académico de

### **MAESTRO EN CIENCIAS**

Presentada por:

**HERNÁN WILBERT FERNÁNDEZ GÁLVEZ**

ASESOR:

**Dr. Ing. WILFREDO RENÁN FERNÁNDEZ MUÑOZ**

**CAJAMARCA, PERÚ**

**2017**

**COPYRIGHT © 2017 BY  
HERNAN WILBERT FERNÁNDEZ GÁLVEZ  
Todos los derechos reservados**

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



## **PROGRAMA DE MAESTRÍA**

### **MENCIÓN: INGENIERÍA Y GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN**

#### **TESIS APROBADA:**

#### **EFECTO DEL ADITIVO TERRAZYME EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS DE SUBRASANTES EN LA ZONA DE EXPANSION DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA**

Para optar el Grado Académico de

#### **MAESTRO EN CIENCIAS**

Presentada por:

**HERNÁN WILBERT FERNÁNDEZ GÁLVEZ**

#### **Comité Científico**

Dr Wilfredo Fernández Muñoz  
Asesor

Msc. José Marchena Araujo  
Presidente del Comité

Msc. Katherine Fernández León  
Primer Miembro Titular

Msc. Héctor Pérez Loayza  
Segundo Miembro Titular

**CAJAMARCA - PERÚ**

**2017**



## Universidad Nacional de Cajamarca

### Escuela de Posgrado

#### PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

##### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 09:00 de la mañana del día 16 de junio de dos mil diecisiete, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Comité Científico Evaluador presidido por el **M.Cs. JOSÉ MARCHENA ARAUJO**, en Representación del Director y como Miembro del Comité Científico, **Dr. WILFREDO FERNÁNDEZ MUÑOZ**, en calidad de Asesor, **M.Cs. KATHERINE FERNÁNDEZ LEÓN**, **Mg. HÉCTOR PÉREZ LOAYZA**, como integrantes del Comité Científico. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **"EFECTO DEL ADITIVO TERRAZYME EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS DE SUBRASANTES EN LA ZONA DE EXPANSIÓN DE LA CIUDAD DE CAJAMARCA"**, presentada por el **Ing. Geólogo HERNÁN WILBERT FERNÁNDEZ GÁLVEZ**, con la finalidad de optar el Grado Académico de **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la facultad de Ingeniería, con Mención en **INGENIERÍA Y GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Comité Científico, y luego de la deliberación, se acordó ~~APROBAR~~ con la calificación de ~~DIPLASIS (16)~~ SUM LAUDE..... la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Ing. Geólogo HERNÁN WILBERT FERNÁNDEZ GÁLVEZ**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la facultad de Ingeniería, con Mención en **INGENIERÍA Y GERENCIA DE LA CONSTRUCCIÓN**.

Siendo las 12:30 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

M.Cs. José Marchena Araujo  
Miembro de Comité Científico

Dr. Wilfredo Fernández Muñoz  
Asesor

M.Cs. Katherine Fernández León  
Miembro de Comité Científico

Mg. Héctor Pérez Loayza  
Miembro de Comité Científico

## DEDICATORIA

A mis queridos padres Renán y Judith, quienes me enseñaron desde pequeño a luchar para alcanzar mis metas. Mi triunfo es el de ustedes ¡Los amo!

A mi querida esposa Mónica por ser una persona excepcional quien me ha brindado su apoyo incondicional y ha hecho suyos mis preocupaciones y problemas, gracias por tu amor, paciencia y comprensión, a mis hijos Andrea y Hernán para quienes ningún sacrificio es suficiente, quienes son la luz que ha iluminado mi vida y hace mi camino más claro.

A mis Hermanos Renán, Larissa y Roybert por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación.

***Hernán***

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios Todo Poderoso quien me dio la fortaleza espiritual y física necesaria para cumplir mi objetivo para desarrollar esta investigación.

Para mi asesor Doctor Wilfredo Fernández Muñoz, quien me permitió realizar esta investigación y depositar su confianza en mi persona.

A la Universidad Nacional de Cajamarca – Escuela de Postgrado y a sus docentes que asumió el reto de mi formación y con ella a todos y cada uno de mis maestros, en especial a aquellos que por sus cualidades integrales me ayudaron a culminar esta fascinante profesión.

***Hernán***

## EPÍGRAFE

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados de Universidad Nacional de Cajamarca, presento a vuestra disposición la Tesis Titulada **“Efecto del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona de expansión de la ciudad de Cajamarca”** con el objetivo de obtener el Grado de Magister.

Considero que la presente Tesis está sujeta a cualquier corrección que ustedes crean pertinente y espero que el mismo contribuya a incrementar los conocimientos sobre la materia.

Por lo expuesto señores miembros del Jurado, no me queda más que acogerme al resultado de vuestro dictamen y agradecer por brindarme su valioso tiempo.

***Hernán***

## INDICE

DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO.....	VI
EPÍGRAFE.....	VII
INDICE.....	VIII
INDICE DE TABLAS.....	X
INDICE DE FIGURAS .....	XI
INDICE DE FOTOS .....	XII
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XIV
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	6
1.3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
1.4. LIMITACIONES .....	9
1.5. OBJETIVOS .....	9
CAPÍTULO II.....	11
MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN O MARCO REFERENCIAL.....	11
2.2. MARCO DOCTRINAL.....	15
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	63
2.4. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	63
CAPÍTULO III.....	65



PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	65
3.1. HIPÓTESIS: .....	65
3.2. VARIABLES/CATEGÓRICAS .....	65
CAPÍTULO IV .....	68
MARCO METODOLÓGICO .....	68
4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	68
4.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	68
4.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	69
4.4. POBLACIÓN, MUESTRA, UNIDAD DE ANÁLISIS Y UNIDAD DE OBSERVACIÓN. ... .....	70
4.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	70
4.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	71
4.7. EQUIPOS, MATERIALES, INSUMOS, ETC. ....	71
4.8. MATRIZ DE CONSISTENCIA METODOLÓGICA .....	73
CAPITULO V .....	74
RESULTADO Y DISCUSION .....	74
5.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	74
5.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS. ....	80
5.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPOTESIS.....	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
PANEL FOTOGRÁFICO .....	96
ANEXOS.....	100

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tamaños de mallas Standart.....	21
Tabla 2 Límites de tamaño de suelos separados. ....	23
Tabla 3. Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras .....	29
Tabla 4. Identificación de los suelos en el sistema SUCS.....	30
Tabla 5. Especificaciones para la prueba Próctor estándar (ASTM D-698) .....	33
Tabla 6. Especificaciones para la prueba Próctor Modificado (ASTM D-1557) .....	33
Tabla 7. Cálculo del Índice del CBR.....	34
Tabla 8. Valores de carga unitaria .....	34
Tabla 9. Clasificación típica para el uso de diferentes materiales .....	36
Tabla 10: Granulometría del afirmado .....	44
Tabla 11. Especificaciones técnicas de TerraZyme .....	54
Tabla 12. Muestra: Puntos críticos Progresivas .....	70
Tabla 13. Diseño Patrón CBR .....	74
Tabla 14. Aditivo Terrazyme 10 ML.....	75
Tabla 15 Aditivo Terrazyme 20 ML.....	75
Tabla 16. Aditivo Terrazyme 30 ML.....	75
Tabla 17: Aditivo Terrazyme 40 ML.....	76
Tabla 18. Aditivo Terrazyme 60 ML.....	77
Tabla 19: Profundidad de las calicatas.....	81
Tabla 20: Clasificación de suelos .....	82

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección Típica de un Pavimento .....	20
Figura 2. Tamaño del grano, D (mm) .....	22
Figura 3. Límites de consistencia.....	24
Figura 4. Dimensiones de la ranura en la copa de Casagrande para determinar el límite líquido. ....	25
Figura 5. Carta de Plasticidad.....	27
Figura 6. Carta de Plasticidad.....	30
Figura 7. Representación de la compactación de los granos de suelo. ....	31
Figura 8. Forma de las arcillas.....	37
Figura 9. Esquema de la estabilización física (Marquez, 2005) .....	42
Figura 10. Carretera de 1º y 2º categoría .....	51
Figura 11. Pavimento con losa de concreto .....	52
Figura 12. Carreteras rurales .....	52
Figura 13. Carreteras sin sub base .....	53
Figura 14. Proceso químico del estabilizador TerraZyme .....	56
Figura 15. Reducción de los estratos alrededor de la lámina de arcilla .....	56
Figura 16. Lámina de arcilla con cationes orgánicos.....	57
Figura 17. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 1.....	83
Figura 18. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 2.....	84
Figura 19. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 3.....	85
Figura 20. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 4.....	86
Figura 21. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 5.....	87
Figura 22. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 6.....	88
Figura 23. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 7.....	89

## INDICE DE FOTOS

FOTO 1: Tomando las coordenadas de la Calicata N° 1 .....	96
FOTO 2: Realizando la excavación de Calicata N° 5 .....	96
FOTO 3: Colocación del aditivo Terrazyme a la muestra .....	97
FOTO 4: Realizando los ensayos en laboratorio con la colocación del aditivo Terrazyme a la muestra. ....	97
FOTO 5: Midiendo los porcentajes de aditivo con terrazyme para los ensayos en laboratorio.....	98
FOTO 6: Midiendo los ensayos en laboratorio capacidad de soporte de terreno muestra 6.....	98
FOTO 7: Midiendo los ensayos en laboratorio capacidad de soporte de terreno muestra 3.....	99
FOTO 8: Equipos de laboratorio. ....	99

## RESUMEN

Esta investigación se realizó en la zona de expansión al sur este de la Ciudad de Cajamarca- Huacariz, Provincia Cajamarca, Región Cajamarca. El problema principal fue ¿Cuál es el efecto del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz?, el objetivo fue determinar el efecto del aditivo terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz. La utilización del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante incrementó 19% de la capacidad de soporte del terreno. Se realizaron siete excavaciones geotécnicas, por cada muestra se realizó cinco ensayos colocando una proporción de terrazyme de 10, 20, 30 40 y 60 ml/m<sup>3</sup> para encontrar el porcentaje óptimo de terrazyme para el mejoramiento de la subrasante además se realizó 35 CBR con aditivo y siete de la muestra patrón. Con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes en las calicatas se concluyó que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, incrementó su resistencia, en la calicata 1: 113 %; calicata 2: 90%; calicata 4: 98%; calicata 5: 112%; calicata 6: 115%; calicata 7: 119%; calicata 3: 98%; Calicata 5:112%; calicata 6: 115%; calicata 7: 119%

Palabras Claves: Terrazyme, Subrasante y suelo

## ABSTRACT

This research was conducted in the expansion of Cajamarca- Huacariz City, Cajamarca Province, and Cajamarca Region. The main research problem was: What is the effect of the Terrazyme additive on the stabilization of clay soils of the subsoil in the south eastern zone expansion of the Cajamarca – Huacariz city?, the objective was determine the effect of the terrazyme additive on the stabilization of clay soils of the subsoil in the south eastern expansion zone of the Cajamarca – Huacariz city. The use of the Terrazyme additive in the stabilization of clay soils of the subsoil increases 111% of the terrain support capacity. In the study were performed seven Geotechnical excavations, Six test were performed for each sample and they placed a terrazyme ratio of 10, 20, 30 40 and 60ml /m<sup>3</sup> to find the optimal percentage of terazyme for the improvement of the subsoil. With the addition of the Terrazyme additive in its different percentages in the pits, it was observed that the increase of the soil support capacity in 30ml / m<sup>3</sup>, increased its resistance, in calicata 1: 113 %; calicata 2: 90%; calicata 4: 98%; calicata 5: 112%; calicata 6: 115%; calicata 7: 119%; calicata 3: 98%; Calicata 5:112%; calicata 6: 115%; calicata 7: 119%

Keywords: Terrazyme, CBR Test, Subbase and soil

## **CAPÍTULO I**

### **INTRODUCCIÓN**

La Mecánica de suelos es una disciplina fundada formalmente por Karl Terzaghi en la segunda década del siglo XX, que tiene por objeto el estudio y la resolución de los problemas derivados de la aplicación de cargas en la superficie de la tierra (suelo) a través del conocimiento y aplicación de leyes físico-matemáticas. Si tenemos en cuenta que cualquier obra civil está construida sobre o en el suelo o incluso utilizando el suelo como material de construcción, queda patente la importancia de esta disciplina en el desempeño del ejercicio profesional de cualquier Ingeniero Civil (Tomas, Cano , Garcia, Santamarta, & Hernandez, 2012) .

Uno de los mayores problemas a que va enfrentando el ingeniero civil en su trabajo de campo, es encontrar suelos que no cumplan con las especificaciones generales para establecer sobre este como es el caso de una estructura de pavimento. En muchas ocasiones se hace necesario remover grandes cantidades de material para sustituirlo por otro que presente excelentes características mecánicas, lo que implica un sobre costo en la ejecución del proyecto.

La estabilización de los suelos en la ingeniería práctica, particularmente en las vías terrestres, ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento mecánico de los suelos. Este proceso ha atendido a diversos requerimientos, tales como la resistencia al esfuerzo normal, la deformabilidad o comprensibilidad, la estabilidad volumétrica ante la presencia de agua, entre otros, buscando en todos los casos un buen comportamiento mecánico de los suelos y de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil (Sanchez, Castro, Ureña, & Azañon, 2014)

En el campo de la construcción de vías, terraplenes, patios, vías férreas, puertos, etc., las acciones medioambientales de los aditivos químicos se dan a través del

aprovechamiento de suelos inestables y expansivos (arcillas) mediante la técnica de estabilización de suelos.

En los terrenos arcillosos, particularmente en climas áridos o semiáridos, es altamente probable encontrar problemas relacionados con inestabilidades volumétricas ante la ganancia o pérdida de agua. Existen en la práctica diversos métodos para estabilizar a tales suelos; cada método, utiliza diferentes agentes estabilizadores, entre los que se pueden encontrar: la cal, el cemento Portland, productos asfálticos, ácidos orgánicos, resinas y polímeros, sales entre otros (Diaz & Mejia, 2004)

Actualmente en el Perú, el Gobierno está llevando un agresivo programa orientado hacia el desarrollo vial, a través de la construcción y rehabilitación de carreteras. Programa en el cual se incluye el uso de estabilizadores como insumo indispensable para otorgarle mayor vida útil y, consecuentemente, lograr un considerable ahorro. TerraZyme, es una alternativa eficaz para la estabilización de carreteras cuya formulación líquida enzimática natural, no tóxica y biodegradable mejora la calidad de las obras de ingeniería. TerraZyme cataliza la degradación de los materiales orgánicos en el suelo alterando favorablemente sus atributos físicos y químicos. Esto da como resultado una mejor unión química de partículas cohesivas de suelo y una estructura de suelos más estable y duradera. Suelos tratados con TerraZyme alcanzan alto porcentaje de compactación con menos esfuerzo mecánico.

El incremento de la densidad mejora la unión entre las partículas otorgándole mayor resistencia frente a la deformación de caminos, a la migración ascendente de las partículas finas y a la penetración de agua. El uso de TerraZyme en la construcción y reparación mejora notablemente el rendimiento y la durabilidad de los caminos de tierra (Terrazyme, 2014)



En la presente tesis se busca la implementación de nuevas tecnologías en el proceso de estabilización de suelos, atendiendo la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas del suelo, buscando la proporción óptima de suelo – aditivo con el fin de obtener la mayor resistencia, economía y estabilidad. Se utilizó suelos propios de la parte de la expansión urbana de Cajamarca.

## **1.1. Planteamiento del problema**

### **1.2.1.Contextualización**

La formación geológica de los suelos del valle de Cajamarca está constituida por depósitos cuaternarios de materiales residuales, con presencia de finos (arcillas y limos) producto de la meteorización de las secuencias clásticas y no clásticas de las rocas existentes, que generan deformaciones en los suelos por efecto de saturación de agua, lo cual ocasiona fallas en los diferentes tipos de pavimentos (flexibles y rígidos).

Estabilización de suelos con aditivos es una técnica muy utilizada en Ingeniería Civil que sirve para mejorar las propiedades físicas y mecánicas, sus parámetros son la alta plasticidad, baja permeabilidad y capacidad de soporte del terreno, lo que los hacen inadecuados para su uso como materiales de construcción. La adición de materiales tales como cal, yeso, cemento y otros aditivos, se utiliza con frecuencia en los suelos críticos, estabilizándolos para mejorar su resistencia (Sanchez, Castro, Ureña, & Azañon, 2014)

A nivel mundial, nacional y local las arcillas expansivas son excesivamente peligrosas en todas las obras de ingeniería como edificaciones, puentes, estabilidad de taludes, centrales hidroeléctrica, presa y pavimentos; debido a

las deformaciones y asentamientos diferenciales causando pérdidas económicas considerables.

En la naturaleza, por las condiciones climáticas las arcillas expansivas sufren cambios importantes de contenido de agua: en época de lluvias el estrato superior se satura y en época de estiaje se produce el fenómeno de desecación y esta capa superficial se comporta como un suelo parcialmente saturado (Camarena, Ordoñez, & Guichard, 2014).

En la zona Sur Este de expansión Cajamarca - Huacariz, se ha determinado puntos críticos por las deformaciones de los suelos debido al transporte público y especialmente maquinaria pesada, que dejan ahuellamientos, asentamientos en la capa de rodadura del pavimento, produciendo demoras en el transporte, deterioro de los vehículos y pérdidas económicas.

La problemática existente, es cómo conservar estos caminos con una buena transitabilidad, con bajos costos de inversión y mantenimiento. Durante mucho tiempo se ha buscado mecanismos que solucionen este problema, formulando estudios propios y soluciones basadas en referencias y experiencias internacionales, con la finalidad de mejorar los caminos sin pavimentar, incorporando las ventajas que ofrecen diferentes métodos de estabilización de suelos, dentro de ellas los estabilizadores químicos.

En tal sentido, la presente investigación tuvo como objetivo fundamental estudiar el potencial del aditivo Terrazyme en los puntos críticos de los suelos de la zona Sur Este de expansión Cajamarca – Huacariz, para dar solución geotécnicamente a los suelos críticos para evitar las deformaciones.

### **1.2.2.Descripción del problema**

En la zona de investigación existen zonas críticas por ser una carretera afirmada donde no hubo ningún tipo de mejoramiento de suelo por que no

existió un estudio consensuado detallado minuciosos de mecánica de suelos y mucho menos de un mejoramiento de la subrasante mediante aditivos químicos que permitan elevar la capacidad de soporte de terreno donde se produce las fallas de un pavimento rígido y flexible.

Actualmente los pavimentos de la zona de expansión de Cajamarca, se encuentran a nivel de afirmado totalmente deteriorados, debido al intemperismo del tiempo como son, temperatura, clima, agua y otros. Ello se produce debido a las constantes lluvias y a la falta constante del mantenimiento de los pavimentos por la entidad competente, ocasionara deformaciones, ahuellamientos y asentamientos sobre la estructura del pavimento.

En Cajamarca existen diferentes tipos de suelos como son gravas, arenas, limos y arcillas y cada cual tiene un comportamiento ante las cargas de los vehículos y maquinarias pesadas que producen fallas en los pavimentos. Las arcillas por su condición de suelo expansivo sufren variaciones de volumen ante cambio de humedad, ocasionando fallas y asentamientos, provocando patologías en la estructura del pavimento y a la vez produciendo problemas en los usuarios como deterioro de vehículos, incomodidad en el transporte, mayores tiempos de viaje, afectando el estilo de la comunidad.

Dado la problemática existente, hoy en día con los diferentes tipos de investigación hay mejoras en la capacidad de soporte del suelo con la utilización de adiciones como cal, cemento, aditivos químicos y otros en diferentes porcentajes por peso de material, de manera que se optimice la calidad del suelo logrando tener mejores vías y en beneficio de la comunidad.

### **1.2.3. Formulación del problema**

¿Cuál es el efecto del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz?

## **1.2. Justificación e importancia**

### **1.2.1. Justificación científica**

A nivel mundial, nacional y local los problemas de deformaciones de los suelos debido especialmente a los suelos finos como arcillas y limos han hecho colapsar a muchas estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, es por ello que en las últimas décadas se han estudiado aditivos para mejorar la subrasante tales como cloruro de sodio, cloruro de potasio, terrazyme y otros; que han dado en sus investigaciones buenos resultados en esta investigación se ha tratado de utilizar el aditivo terrazyme que ha elevado la capacidad de soporte de terreno a un buen porcentaje, que es un aporte para las instituciones públicas y privadas. Los métodos utilizados son diferentes para cada aditivo en la proporción por cada metro cúbico de material basándose en las características físicas químicas y mecánicas es la primera vez que se han hecho estudios con este aditivo en la zona de expansión sur este de la ciudad de Cajamarca- Huacariz, teniendo perspectivas futuras para otras investigaciones en diferentes porcentajes del aditivo por metro cúbico de material que solucionen el problema de esta investigación.

El aporte teórico que se ha logrado es solucionar el problema de las fallas de la subrasante agregando un nuevo aditivo terrazyme para mejorar las características físicas y mecánicas del suelo de fundación.

En esta investigación nos hemos basado en la teoría de Rollins 1998, donde establece que los análisis usuales durante la pre construcción granulometría del suelo, límite líquido e índice de plasticidad, ph, humedad natural, ensayo proctor. DCP/CBR y medidas de densidad en carreteras tratadas, para establecer el incremento de compactación con respecto al tiempo. Las condiciones en el campo y resultados se simulan en el laboratorio.

Cuyos resultados se pueden generalizar para la clasificación de suelos indicadas en las conclusiones como arcillas de media y alta plasticidad; incrementado el conocimiento teórico y práctico para futuras construcciones de pavimentos flexibles y rígidos con estas características físicas y mecánicas del suelo.

### **1.2.2. Justificación técnica – práctica**

Es importante porque se alinea al estudio de las técnicas de estabilización se suelos arcillosos para controlar sus efectos dañinos en los pavimentos con respecto a su estabilización en los puntos críticos de la subrasante en la zona de expansión Sur Este de la ciudad de Cajamarca – Huacariz.

En la presente investigación se determinó las características físicas y mecánicas del suelo de fundación de los pavimentos como son CBR, análisis granulométrico, contenido de humedad, peso específico, límites de attemberg y otros, lo que permitirá determinar el porcentaje de aditivo Terrazyme para elevar la capacidad de soporte del terreno.

Técnicamente el uso del aditivo Terrazyme se justifica porque ayudará a obtener alto rendimiento en elevar la capacidad de soporte del terreno en la subrasante de los puntos críticos en suelos finos y bajo costo por que minimizando el transporte de materiales como over, afirmados y otros, aumentando la densidad del suelo, reduciendo problemas de trabajo y mantenimiento de caminos, aumentando la capacidad de soporte (%CBR), disminuyendo la permeabilidad del agua y aumentando la resistencia a la compresión.

El impacto que se planteó en esta investigación es que en el objetivo principal es determinar el aumento de capacidad de soporte de las subrasantes de los suelos críticos de la zona sur este de la ciudad de Cajamarca –Huacariz.

La investigación de esta tesis radica en solucionar el problema de las deformaciones que sufren los suelos arcillosos y limosos debido al agua, produciéndose fallas de tracción y compresión debilitando la compactación y posteriormente el colapso de la estructura.

Los motivos que me llevaron a elegir esta investigación es solucionar los problemas de los pavimentos en la ciudad de Cajamarca y a nivel nacional, en mi experiencia profesional como ingeniero Geólogo he observado infinidades de pavimentos rígidos, flexibles y afirmados que han colapsado debido a las arcillas las cuales causan asentamientos y deformaciones a los suelos de fundación.

### **1.2.3. Justificación institucional y personal**

Se justifica porque las instituciones públicas y privadas como la Municipalidad de Cajamarca, Gobierno Regional, Universidades se beneficiarán buscando solución a los problemas de estabilización de suelos arcillosos en el diseño de pavimentos que permitan un mejor desarrollo para Cajamarca.

Esta investigación permitirá verter todos los conocimientos adquiridos del Maestría de su Alma Mater, en parte teórica y práctica en beneficio del departamento de Cajamarca, a nivel nacional e internacional.

### **1.3. Delimitación de la investigación**

Se desarrolló en la zona de expansión de Huacariz al Sur- Este de la ciudad de Cajamarca.

Se realizaron siete exploraciones geotécnicas y se ejecutó ensayos de CBR.

### **1.4. Limitaciones**

No se presentaron limitaciones en el transcurso de la investigación.

### **1.5. Objetivos**

#### **1.5.1. Objetivo general**

Determinar efecto del aditivo terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz.

### **1.5.2.Objetivos específicos**

Determinar las características físicas, químicas y mecánicas de los suelos de fundación en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz.

Determinar la capacidad de soporte de terreno de la subrasante con diferente porcentaje del aditivo Terrazyme en porcentajes de 10, 20, 30 ,40 y 60 .



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación o marco referencial

Terrazyme, 2014. En el estudio Efectos del CBR% en los suelos tratados con TerraZyme, se realizaron pruebas de CBR en especímenes compactados en condiciones de laboratorio en gradaciones de suelo grueso, medio y fino. Para la prueba de CBR se utilizaron especímenes sin estabilizante (grupo control) y especímenes con estabilizante TerraZyme (grupo experimental) en cantidades y procedimientos normales que indica el fabricante, comparados con el grupo control. Se realizaron pruebas múltiples de CBR con estabilizante, se probaron a 1, 4 y 14 semanas después de compactado los especímenes. La Mejoría con el tratamiento TerraZyme requiere de 4 semanas para desarrollarse plenamente. La mejora relativamente pequeña se observó a una semana de tratamiento, se dio mejoras significativas en las semanas 4 y 14. Las evaluaciones significativas de laboratorio o de campo de los efectos del TerraZyme deben ser medidos después de varias semanas de "curar" en lugar de inmediatamente después.

Solminhac, Echevarria, & Thenoux, 2013. En su investigación "Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones de estructuras de pavimentos", concluye que el aumento de capacidad de soporte del terreno aumenta en un 25% en arcillas con la utilización de cal, cemento y yeso.

Sánchez, Castro Ureña & Azañón, 2014. En su artículo "Estabilización de suelos arcillosos y margas, utilizando residuos industriales: PH e indicadores granulométricos", concluye que la cal dolomítica era tan eficaz como la cal comercial

para modificar las propiedades de ambos tipos de suelos.

Seco, Ramírez, Miqueleiz , Garcia, & Prieto, 2010. En su artículo “Uso de aditivos no convencionales en la estabilización de margas”, concluyen que el contenido óptimo de cal es de 3%, mejorando características como CBR y los ensayos a compresión no confinada.

Rojas & Camargo, 2004. En su tesis “Estabilización físico – química de suelos finos para subrasantes de vías rurales”, concluyo que de la evaluación de los agentes estabilizadores con base a la dosificación planteada, se determinó que el aditivo más eficaz corresponde al ion calcio (cal viva) disminuye la plasticidad de un 47% a un 5% y un aumento de un CBR de 1.1% a un 24.5% a los 15 días.

Diaz & Mejia, 2004, en su investigación “Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo químico a base de compuestos inorgánicos”, concluyen que la capacidad de soporte del suelo se incrementa notablemente con la adición del aditivo químico; igualmente reduce notablemente la expansión.

Junco del Pino & Tejada, 2011, en su artículo “Aditivo químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes de carreteras”, concluye que reduce la permeabilidad del suelo en un 15%, lo cual es ventajoso en la ejecución de obras viales, así como el aumento de la capacidad de soporte; ya que con ello podemos asegurar que los costos de mantenimiento futuro serán menores.

Velarde, 2015, en su investigación “Aplicación de la metodología de superficie de respuesta en la determinación de la resistencia a la compresión simple de suelos arcillosos estabilizados con cal y cemento”, (Tesis de titulación, Universidad Nacional del Altiplano), concluye que Los resultados de la investigación fueron

satisfactorios pues la región propuesta como viable para establecer los porcentajes óptimos de cal y cemento logro obtener valores de la resistencia a la compresión simple elevados.

Sanchez, Castro, Ureña, & Azañon, 2014, investigan la evaluación de Aditivos Químicos en la Eficiencia de la Conservación de Superficies de Rodadura en Carreteras No Pavimentadas, tiene como objeto evaluar la eficiencia superficial del suelo estabilizado con los compuestos químicos cloruro de calcio y enzima PZ-22X por medio de un sistema de monitoreo después de aplicados; en el que concluyo que los sectores en donde se aplicaron los aditivos después de 117 días de aplicación, presentaron mayor variación del IRI con respecto al tramo patrón. En el sector B (cloruro de calcio) aumento 107% y en el sector C (enzimático) aumento en un 62% con respecto al sector A (sin aditivo) que presentó variación de un 45%.

Gutierrez, 2010 menciona la estabilización Química de Carreteras No Pavimentadas en el Perú y ventajas Comparativas Del Cloruro De Magnesio (Bischofita) Frente Al Cloruro De Calcio, comprobó el aumento de la máxima densidad seca conforme se le iba aumentado el porcentaje de aditivo (3%, 4% y 5%); además de que Para el Cloruro de Magnesio se necesitan altas cantidades para tener altas concentraciones (28%) que a comparación del cloruro de calcio no sucede así (40%).

Espinoza, 2012, en su Tesis de Investigación "Uso de Estabilizantes Químicos en la Mejora de las Propiedades Físicas y Mecánicas de los Suelos de Fundación Limosa o Arcillosa", concluye que el aumento de la capacidad de soporte de terreno varía entre 75% a un 125% a 14 semanas después de la compactación.

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, en la evaluación del comportamiento de pavimentos afirmados estabilizados con aditivos químicos, a un año de la ejecución de tramos experimentales de prueba en diferentes regiones del Perú. Concluye y recomienda lo siguiente:

- Concluye que los tramos estabilizados soportaron las lluvias y el efecto abrasivo del tráfico, teniendo mejor comportamiento estructural con respecto al tramo patrón de referencia. Presentan mejores características físico-mecánicas con respecto al suelo no estabilizado, mejorando su capacidad soporte, disminución de la permeabilidad y reducción significativa de la contaminación por polución de polvo.
- Concluye que se aplicaron productos estabilizadores de suelos en los tramos experimentales conformado por gravas limo-arcillosas de baja a mediana plasticidad, los resultados son adecuados cuando se cumple las recomendaciones del productor, se caracterice los materiales sobre los cuales se aplicará el estabilizador, se realice un adecuado amasado, mezclado, compactado y curado durante la etapa constructiva, se asegure el correcto funcionamiento de los sistemas de drenaje y subdrenajes, y se conforme secciones transversales con bombeo no menor a 3%.
- Concluye que los aspectos más importantes en la estabilización de suelos, no son sustancias homogéneas, ocurren cambios en su composición dentro de áreas muy pequeñas. Afectando directamente su reactividad hacia el agente estabilizante, siendo considerado como un aspecto problemático para la construcción de un camino estabilizado; para determinar la óptima dosificación del estabilizador se realizará ensayos de laboratorio con los suelos naturales y diferentes porcentajes del estabilizador.

En su Tesis de Investigación “Influencia de la Cal y Yeso en la Estabilización de los Suelos Arcillosos en la Carretera Cajamarca – Cumbe Mayo”, concluye que el aumento de la capacidad de soporte de terreno varía entre 60% al 90%. (Chavez, 2014)

## **2.2. Marco doctrinal**

### **Mecánica de Suelos**

Mayoral, Leyva, & Sanchez, 2011, mencionan que la mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la física y las ciencias naturales a los problemas que involucran las cargas impuestas a la capa superficial de la corteza terrestre. Esta ciencia fue fundada por Karl von Terzaghi, a partir de 1925.

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.

### **Pavimento**

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, menciona que un pavimento es un elemento estructural monocapa o multicapa apoyado en toda su superficie, diseñado y construido para soportar cargas estáticas y/o móviles durante un periodo de tiempos predeterminados, durante el que necesariamente deberá recibir algún

tipo de tratamiento, tendiendo a prolongar su “vida de servicio”.

Estando formado por una o varias capas de espesores y calidades diferentes que se colocan sobre el terreno preparado para soportar, tiene por su función más importante el proporcionar una superficie resistente al desgaste y suave al deslizamiento y un cuerpo estable y permanente bajo la acción de las cargas. Un pavimento está pues constituido de abajo hacia arriba, por las siguientes capas:

### ***Suelo de Fundación***

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, menciona que el suelo de fundación en términos generales, es el terreno conformado por suelo, roca o mezcla de ambos, en corte, relleno o en corte y relleno compensados, cuya porción nivelada, perfilada y compactada, sirva de soporte al pavimento. Los suelos de fundación en corte pueden encontrarse en la naturaleza en bancos uniformes de suelos granulares, cohesivos o intermedios.

### ***Sub-rasante***

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, menciona que la subrasante es la porción superior del suelo de fundación que ha sido nivelada, perfilada y compactada y que servirá de apoyo a las diferentes capas del pavimento.

En lo que respecta a su calidad el MTC distingue dos grupos de materiales:

- Para sub-rasante: Cualquier tipo de suelo exceptuando materiales blandos e inestables que no sean factibles de compactar, pedrones y lechos de roca.
- Para sub rasante especial: Cualquier suelo que cumpla una de las gradaciones siguientes y que además consista de partículas duras y durables de escorias, piedras o gravas tamizadas o trituradas, libres de residuos vegetales, grumos o terrones de arcilla:

La capacidad de soporte de la sub-rasante se mide con el CBR (California Bearing Ratio o Relación Soporte de California-Norma ASSHTO T193-81) para el caso de pavimentos flexibles, y con el módulo "k" de Reacción de las Sub-rasante (o Coeficiente de Balasto- AASHTO T 221-90) para el caso de pavimentos rígidos.

Una sub-rasante puede ser de buena, regular o mala calidad según su CBR este comprendido entre 60% y 100%, 10% y 60% o 0% y 10%, respectivamente. Si la sub-rasante es buena, puede servir de apoyo directamente a la Superficie de Rodadura; si es mala, conviene estudiar la posibilidad de reemplazarla o estabilizarla con materiales de mejor calidad.

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, indica que a su grado de compactación de las sub-rasantes, el MTC especifica un mínimo de 95% de su Máxima Densidad Seca Proctor modificado (AASHTO T180) cuando el suelo es granular y tiene un máximo de 10% que pasa la malla N°200, con un índice de Plasticidad de 6% o menos. Cuando el suelo es limoso, limo-arenoso o arcilloso, con índice plástico mayor de 10%, el MTC especifica un mínimo de 95% de su Máxima Densidad Seca Proctor Estándar (AASHTO T99), recomendando que durante la compactación no se exceda el Optimo Contenido de Humedad en más de 2%.

La Especificación Estándar AASHTO M57-80 (1990), especifica que los materiales que clasifican como A-1 (gravas), A-2-4, A-2-5 (arenas) o A-3 (limos), deben ser usados como sub-rasante cuando estén disponibles, debiendo compactarse a no menos del 95% de su Máxima Densidad Seca AASHTO T99. Los materiales que clasifican como A-2-6, A-2-7 (arenas), A-4 (limos), A-5, A-6 ó A-7 (arcillas), pueden ser usados si son compactados en la profundidad especificada a no menos del 95% de su Máxima AASHTO T99 y dentro de los

puntos porcentuales de su óptimo contenido de humedad.

La Sub-rasante es de vital importancia en la permanencia de los pavimentos y muchas causas de falla se encuentran en ella, por tal motivo debe ponerse especial cuidado en su selección, tratamiento y compactación.

### ***Sub-base***

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, menciona que la sub base es un material de préstamo que se coloca entre la Sub-base y la Base en un pavimento flexible o entre la Sub-rasante y las losas en un pavimento rígido, para cumplir la función de la capa drenante, anticontaminante y/o resistente.

Chavez, 2014, indica que como capa drenante para facilitar la evacuación lateral de las aguas provenientes del nivel freático, de aniegos o de infiltración a través de las juntas en el caso de un pavimento rígido.

Como anticontaminante, para impedir que las gravas y piedras de la base se introduzcan en una sub-rasante blanda, para minimizar el efecto dañino por causa de las heladas por arcillas expansivas, o para evitar que las losas en un pavimento rígido se vean atascadas químicamente por aguas o suelos agresivos al concreto de cemento Portland. Y como capa resistente en un pavimento flexible en función de su espesor y de su "Coeficiente de Resistencia Relativa".

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, menciona que un pavimento rígido su contribución a la resistencia del conjunto es mínima, teniendo más bien por función adicional el distribuir sobre la sub-rasante las cargas recibidas de las losas de manera uniforme y con valores aceptados por ella, así como prevenir la migración de finos de la sub-rasante hacia la rasante a través de las juntas en el conocido fenómeno de bombeo.



Según el MTC, la sub-base puede ser seleccionada o granular. La sub-base seleccionada es una capa de material con los límites de gradación de una arena para concreto (AASHTO M 6-87) que va ubicada entre la sub-rasante y la sub-base granular y tienen como función primordial la de capa anticontaminante. Las “Especificaciones para Construcción de Carreteras” del MTC también permiten sub-bases seleccionadas de materiales de relaves (residuos de la flotación de minerales), siempre que no sean plásticos.

El valor del CBR característico de la su-base seleccionada es de 15% o más y su densidad compactada no será inferior al 95% de la máxima densidad Proctor Modificado (AASHTO T-180).

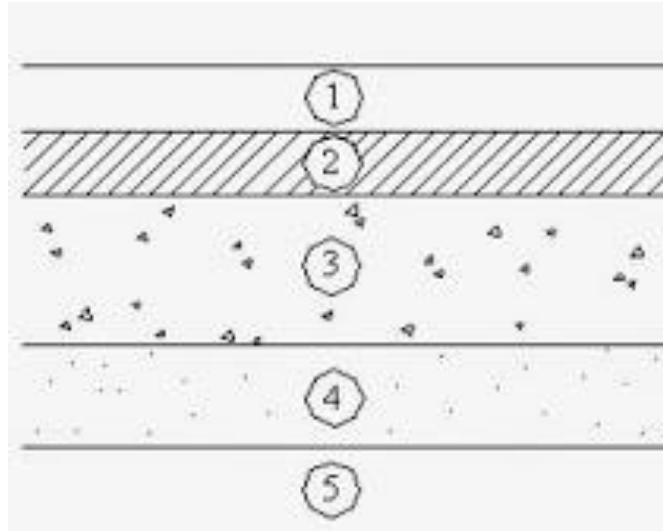
El grado de compactación al que se debe llevar la Sub-base Granular debe ser por lo menos el 100% de su Máxima Densidad Seca Teórica Proctor Modificado

### **Base**

El Ministerio de transporte y comunicaciones, 2012, menciona que la base es el principal elemento estructural en los pavimentos flexibles y que en los pavimentos rígidos puede reemplazar a la Sub-base, pudiendo ser de aglomerados con asfalto (como en el caso de las Bases Negras y estabilizadas), de agregados aglomerados con cemento Portland (como en el caso de las bases estabilizadas con cemento o las bases de concreto compactado con rodillo); o en suelos sin aglomerar como en el caso de los pavimentos rígidos, constituye además el principal elemento estructural. Un pavimento flexible va colocado sobre la sub –rasante o sub-base y debajo de la superficie de rodadura. En un pavimento rígido se coloca debajo de las losas de concreto de cemento Portland y tiene las mismas características y funciones que la sub-base, por eso muchas veces se le denomina indistintamente con uno u otro nombre.

### **Capa de desgaste o Superficie de Rodadura**

Vivar, 1995, menciona que la capa de desgaste es la capa más superficial, que estará en contacto con las sollicitaciones y tiene como función principal el proporcionar una superficie suave al deslizamiento y resistente al desgaste. En el caso de los pavimentos rígidos, constituye además el principal elemento estructural.



**Figura 1.** Sección Típica de un Pavimento

1. Capa de Rodadura
2. Capa Base
3. Capa Sub-base
4. Suelo Compactado
5. Subrasante

Fuente Vivar 1995

### **Propiedades físicas del suelo**

#### **Análisis granulométrico por tamizado**

Braja, 2010, en cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de suelos de grano grueso es generalmente determinada mediante análisis granulométrico por mallas.

Un análisis granulométrico por mallas se efectúa tomando una cantidad medida de suelo seco, bien pulverizado y pasándolo por una serie de mallas cada vez más

pequeñas y con una charola en el fondo. La cantidad de suelo retenido en cada malla se mide y el por ciento acumulado de suelo que pasa a través de cada malla es determinado.

Este porcentaje es denominado el “porcentaje que pasa”, contiene una lista de los números de mallas más usados y el tamaño de sus aberturas. Estas mallas se usan comúnmente para el análisis de suelos con fines de clasificación.

El porcentaje que pasa por cada malla, determinado por un análisis granulométrico por mallas, se grafica sobre una escala semilogarítmica, como se muestra en la (Figura 2) note que el diámetro del grano D se grafica sobre la escala logarítmica y el porcentaje que pasa se grafica sobre la escala aritmética

Tabla 1: Tamaños de mallas Standart.

Criba Nº	Abertura (mm)
4	4.750
6	3.350
8	2.360
10	2.00
16	1.18
20	0.85
30	0.600
40	0.425
50	0.300
60	0.250
80	0.180
100	0.150
140	0.106
170	0.088
200	0.075
270	0.053

*Fuente Braja (2010)*

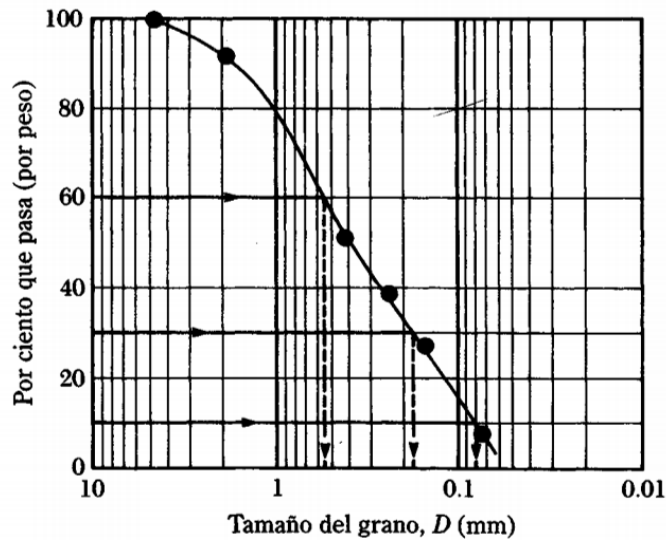


Figura 2. Tamaño del grano,  $D$  (mm)

*Fuente:* Braja (2010)

Braja, 2010, varias organizaciones han intentado desarrollar los límites de tamaño para gravas, arenas, limos y arcillas en base a los tamaños de las partículas de los suelos presenta los límites de tamaño recomendados en el sistema de la American Association of State Highway and transportation Officials (AASHTO) y en el sistema Unified Soil Classification (Corps of Engineers, Department of the Army y Bureau of Reclamation). Muestra que las partículas de suelo más pequeñas que 0.002mm son clasificadas como arcilla. Sin embargo, las arcillas por naturaleza son cohesivas y pueden convertirse en filamento cuando están húmedas. Esta propiedad es causada por la presencia de minerales de arcilla tales como la caolinita, la ilita y la montmorillonita. En contraste, algunos minerales como el cuarzo y el feldespato pueden estar presentes en un suelo en partículas de tamaño pequeño como los minerales de arcilla. Pero éstas no tienen la propiedad de cohesión de los minerales arcillosos. Por tanto, se denominan partículas de tamaño arcilla y no partículas arcillosas

Tabla 2 Límites de tamaño de suelos separados.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN	TAMAÑO DEL GRANO (mm)
Unificado	Grava: 75mm a 4.75 mm
	Arena: 4.75mm a 0.075 mm
	Limo y arcilla (finos): <0.075mm
AASHTO	Grava: 75mm a 2 mm
	Arena: 2 mm a 0.05 mm
	Limo: 0.05 mm a 0.002 mm
	Arcilla: <0.002 mm

Fuente: Braja (2010)

### ***Plasticidad***

Crespo, 2004, la plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable. Para conocer la plasticidad de un suelo se hace uso de los límites de Atterberg o límites de consistencia, quien por medio de ellos separó los cuatro estados de consistencia de los suelos coherentes (Figura 3). Los mencionados límites son: Límite Líquido (L.L.), Límite Plástico (L.P.) y Límite de Contracción (L.C.), y mediante ellos se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio. Todos los límites de consistencia se determinan empleando el suelo que pase por la malla N° 40. La diferencia entre los valores del límite líquido (L.L.) y del límite plástico (L.P.) da el llamado Índice Plástico (I.P.) del suelo. Los límites líquido y plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo, pero el índice plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla. Cuando no se puede determinar el límite plástico de un suelo se dice que es no plástico (N.P.), y en ese caso el índice plástico se dice que es igual

a cero. El índice de plasticidad indica el rango de humedad a través del cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico

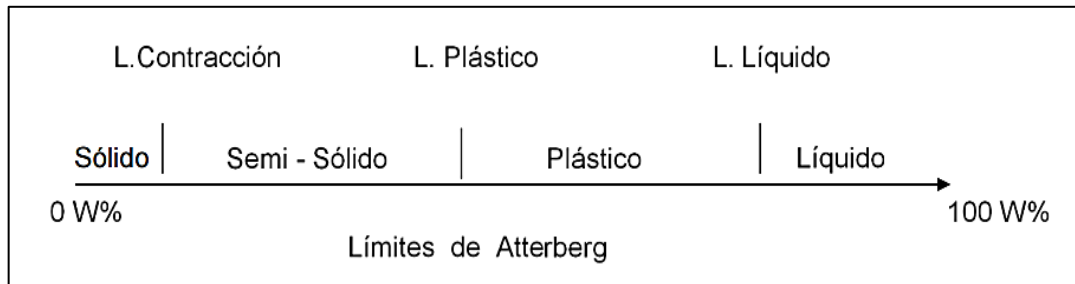


Figura 3. Límites de consistencia

Fuente: Crespo (2004)

### ***Límites de plasticidad***

Juarez & Rico, 1997, para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, de los cuales el debido a Atterberg, se mencionará. Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente del contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido en que la arcilla se comporta plásticamente. Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia

- López, 2003, Límite líquido: la frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada por Atterberg límite líquido  $W_{LL}$ . Ninguna de las pruebas para determinar los límites de Atterberg es difícil de ejecutar, requiere de cierta experiencia para desarrollar la técnica necesaria para obtener resultados reproducibles. La determinación del límite líquido se hace comúnmente utilizando un aparato mecánico, diseñado por Casagrande; se coloca una

muestra del suelo remoldeado en la copa, y se hace una ranura de 2mm de ancho en su base y de 8mm de altura, en el centro de la pasta del suelo. Luego, el operador da vuelta a la manivela que levanta la copa a cierta altura de manera que el punto de contacto entre la copa y la base quede a 1cm sobre la base. Desde esta posición, la copa cae libremente. El suelo está en el límite líquido, si se requieren 25 golpes para hacer que los extremos inferiores de la ranura queden en contacto entre sí, en una longitud de 13mm (0.5"). La humedad que tenga la muestra cuando se le da este número de golpes es el límite líquido

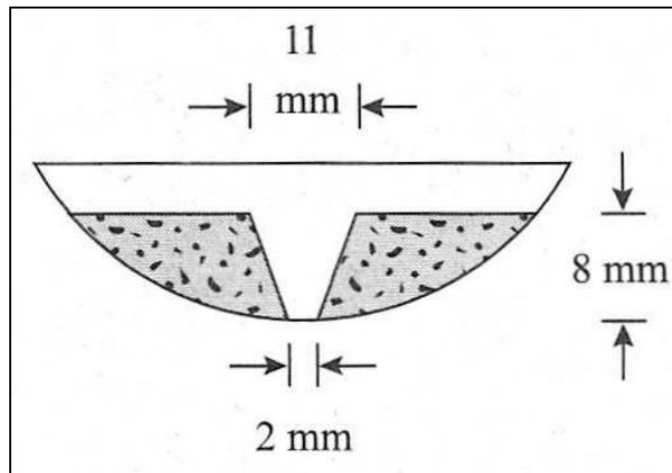


Figura 4. Dimensiones de la ranura en la copa de Casagrande para determinar el límite líquido.

Fuente: Juarez & Rico (1997)

Juarez & Rico, 1997, a partir de investigaciones de los resultados obtenidos por Atterberg con su método original y usando determinaciones efectuadas por diferentes operadores en varios laboratorios, se estableció que el límite líquido obtenido por medio de la copa de Casagrande corresponde al de Atterberg, se define como el contenido de agua del suelo para que la ranura se cierra a lo largo de 1.27cm (1/2"), con 25 golpes en la copa. Esta correlación permitió incorporar a la experiencia actual toda la adquirida previamente al uso de la copa. De hecho,

el límite líquido se determina conociendo 3 o 4 contenidos de agua diferente en su vecindad, con los correspondientes números de golpes y trazando la curva. Contenido de agua – Número de golpes. La ordenada de esa curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua correspondiente al límite líquido

López, 2003, Límite plástico: La frontera convencional entre el estado plástico y semisólido, fue llamado por Atterberg límite plástico  $W_{PP}$ , definido también en términos de una manipulación de laboratorio. La determinación del límite plástico se ejecuta, formando cilindros delgados con una muestra de suelo plástico con un diámetro de 3mm. Si el suelo no se desmorona, se recoge el cilindro, se vuelve a amasar y se rola de nuevo. Se repite este proceso, hasta que el cilindro se comienza a desmoronar, precisamente cuando adquiere el diámetro de 3mm. A la humedad a la que se desmorone y agriete el cilindro se la define como límite plástico

- Índice de plasticidad: La amplitud de variación de la humedad, en la cual el sistema se comporta como material plástico, se llama frecuentemente intervalo plástico, y la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico se le llama índice de plasticidad I.P. El límite líquido y el índice de plasticidad constituyen unidos una medida de la plasticidad de un suelo. Los suelos que poseen  $W_{LL}$  (límite líquido) e I.P. de grandes valores se dicen que son muy plásticos. A los que tienen bajos valores se les llama ligeramente plásticos. La interpretación de las pruebas de los límites líquido y plástico se facilita usando la carta de plasticidad desarrollada por Casagrande.



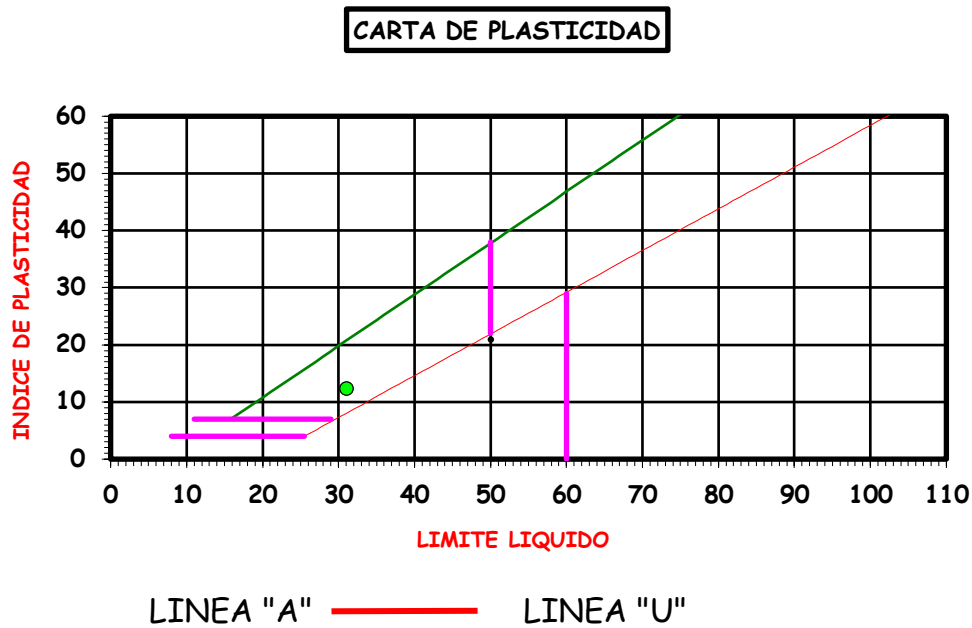


Figura 5. Carta de Plasticidad

Fuente: Lòpez (2003)

### ***Clasificación del suelo***

Braja, 2010, los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril.

Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales del suelo, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada.

Actualmente, dos sistemas de clasificación que usan la distribución por tamaño de grano y plasticidad de los suelos son usados. Éstos son el sistema de clasificación AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Sistema de clasificación AASHTO: Fue desarrollado en 1929 como el Sistema de Clasificación de la Oficina de Caminos Públicos. Ha sufrido varias revisiones, con la versión actual propuesta por el comité para la Clasificación de Materiales para Subrasantes y Caminos Tipo Granulares del Concejo de investigaciones Carreteras en 1945 (Prueba D-3282 de la ASTM; método AASHTO M145).

El sistema de clasificación AASHTO actualmente en uso, se muestra en la tabla 3. De acuerdo con este, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla No200.

Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla No200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

Tamaño del grano

Grava: fracción que pasa por la malla de 75mm. (3") y es retenida en la malla N° 10 (2mm.).

Arena: fracción que pasa por la malla No10 (2mm.) y es retenida en la malla N° 200 (0.074mm.).

Limo y arcilla: fracción que pasa por la malla N° 200.

Tabla 3. Clasificación de materiales para subrasantes de carreteras

Clasificación General	Suelos Granulares 35% máximo que pasa por tamiz de 0.075mm							Suelos Finos mas del 35% pasa por el tamiz de 0.075mm			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de Clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% Que pasa por el tamiz de: 2mm (No10) 0.0425 (No 40) 0.075mm (No 200)	50 max 30 max 15 max	— 50 max 25 max	— 51 min 10 max	— — 35 max	— — 35 max	— — 35 max	— — 35 max	— — 36 min	— — 36 min	— — 36 min	— — 36 min
Características de fracción que pasa el tamiz 0.045mm (No 40) Límite Líquido Índice de Plasticidad	— 6 max		— NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	41 min 11 min
Tipo de material	piedras, grava y arena		arena fina	gravas y arenas limosas o arcillosas				suelos limosos		suelos arcillosos	
Estimación general de suelo	Excelente a Bueno							De pobre a malo			

Fuente: Braja (2010)

- Braja, 2010, menciona que el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS): El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos fue originalmente propuesto por Casagrande en 1942 y después revisado y adoptado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y el Cuerpo de ingenieros. Este sistema se usa en prácticamente todo trabajo de geotecnia. En el Sistema Unificado, los siguientes símbolos se usan como identificación

Tabla 4. Identificación de los suelos en el sistema SUCS

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

Fuente: Braja (2010)

El procedimiento para determinar los símbolos de grupo para varios tipos de suelos. Al clasificar un suelo se debe proporcionar el nombre del grupo que describe generalmente al suelo, junto con el símbolo respectivo.

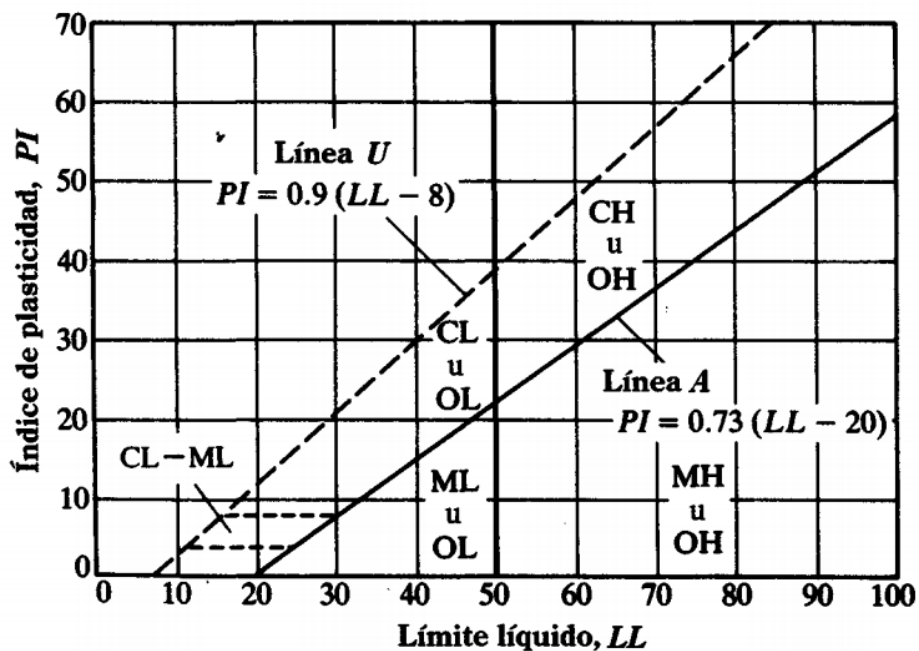


Figura 6. Carta de Plasticidad

Fuente: Braja (2010)

## Propiedades mecánicas el suelo

### Compactación

Chang, 2007 menciona que la compactación es el proceso de empaquetamiento de las partículas de suelo más cercanamente posible por medio mecánico aumentando la densidad seca. Las partículas sólidas son empaquetadas lo más cercanamente por medios mecánicos aumentando la densidad seca. Se reduce la relación de vacíos. Poca o no reducción del contenido de agua. Los vacíos no pueden eliminarse por compactación, por control de ellos se reducen al mínimo

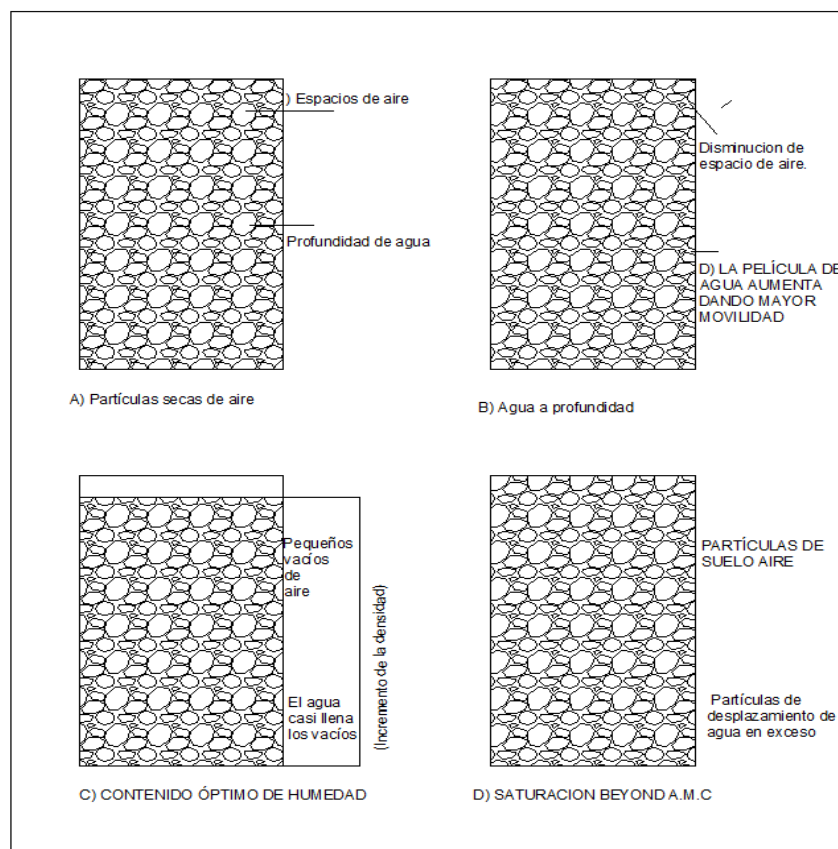


Figura 7. Representación de la compactación de los granos de suelo.

Fuente: Chang (2007)

A bajo contenido de agua el grano de suelo es rodeado por una delgada película de agua.

El agua adicional permite juntar los granos más fácilmente.

El aire es desplazado y la densidad seca es incrementada.

La adición de agua permite expulsar el aire durante la compactación.

Los granos de suelo se muestran lo más cercanos posibles hasta cierto punto y de ahí aumenta la cohesión.

Cuando la cantidad de agua excede lo requerido, el exceso de agua empuja los granos de suelo hacia fuera y la densidad adquirida disminuye.

A mayor contenido de humedad, el aire es desplazado por la compactación y la densidad continúa disminuyendo

Braja, 2010, para realizar la compactación se realizan pruebas estándar de laboratorio usadas para evaluar los pesos específicos secos máximos y los contenidos óptimos de agua para varios suelos son:

- Prueba Próctor estándar (ASTM D-698)
- Prueba Próctor modificada (ASTM D-1557)

El suelo se compacta en un molde en varias capas por medio de un pizón. El contenido de agua,  $w$ , del suelo se cambia y se determina el peso específico seco,  $\gamma_d$ , de compactación en cada prueba. El peso específico seco máximo de compactación y el correspondiente contenido óptimo de agua se determinan graficando  $\gamma_d$  versus  $w$  (%).

Tabla 5. Especificaciones para la prueba Próctor estándar (ASTM D-698)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101.6 mm)	4 pulg (101.6 mm)	6 pulg (152.4 mm)
Volumen del molde	0.0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0.0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0.075 pie <sup>3</sup> (2124 cm <sup>3</sup> )
Peso del pizón	5.5 lb (2.5 kg)	5.5 lb (2.5 kg)	5.5 lb (2.5 kg)
Altura de caída del pizón	12 pulg (304.8 mm)	12 pulg (304.8 mm)	12 pulg (304.8 mm)
Número de golpes de pizón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	12,400 pie-lb/pie <sup>3</sup> (600 kN·m/m <sup>3</sup> )	12,400 pie-lb/pie <sup>3</sup> (600 kN·m/m <sup>3</sup> )	12,400 pie-lb/pie <sup>3</sup> (600 kN·m/m <sup>3</sup> )
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No. 4 (4.57 mm). Puede usarse si 20% o <i>menos</i> por peso de material es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de $\frac{3}{8}$ -pulg (9.5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es <i>más</i> del 20% y 20% o <i>menos</i> por peso es retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ -pulg (9.5 mm).	Porción que pasa la malla de $\frac{3}{4}$ -pulg (19.0 mm). Puede usarse si <i>más de</i> 20% por peso del material es retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ -pulg (9.5 mm) y <i>menos de</i> 30% por peso es retenido en la malla de $\frac{3}{4}$ -pulg (19.00 mm).

Tabla 6. Especificaciones para la prueba Próctor Modificado (ASTM D-1557)

Fuente: Braja ( 2010)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101.6 mm)	4 pulg (101.6 mm)	6 pulg (152.4 mm)
Volumen del molde	0.0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0.0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0.075 pie <sup>3</sup> (2124 cm <sup>3</sup> )
Peso del pizón	10 lb (4.54 kg)	10 lb (4.54 kg)	10 lb (4.54 kg)
Altura de caída del pizón	18 pulg (457.2 mm)	18 pulg (457.2 mm)	18 pulg (457.2 mm)
Número de golpes de pizón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	5	5	5
Energía de compactación	56,000 pie-lb/pie <sup>3</sup> (2700 kN·m/m <sup>3</sup> )	56,000 pie-lb/pie <sup>3</sup> (2700 kN·m/m <sup>3</sup> )	56,000 pie-lb/pie <sup>3</sup> (2700 kN·m/m <sup>3</sup> )
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No. 4 (4.57 mm) Puede usarse si 20% o <i>menos</i> por peso de material es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de $\frac{3}{8}$ -pulg (9.5 mm). Puede usarse si el suelo retenido en la malla No. 4 es <i>más de</i> 20% y 20% o <i>menos</i> por peso es retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ -pulg (9.5 mm).	Porción que pasa la malla de $\frac{3}{4}$ -pulg (19.0 mm). Puede usarse si <i>más de</i> 20% por peso del material es retenido en la malla de $\frac{3}{8}$ -pulg (9.5 mm) y <i>menos de</i> 30% por peso es retenido en la malla de $\frac{3}{4}$ -pulg (19.00 mm).

Fuente: Braja (2010)

### **Capacidad de soporte (CBR)**

Hernández, 2008, la finalidad de este ensayo es determinar la capacidad de soporte (CBR, California Bearing Ratio) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. El ensayo se desarrolló por parte de la División de Carreteras de California en 1929 como una forma de clasificación y evaluación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub-base o material de base en construcciones de carreteras y aeropuertos. El ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un porcentaje de la relación de soporte. El porcentaje CBR (o simplemente CBR), definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado penetre a una profundidad determinada, una muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y con igual velocidad, una probeta con una muestra estándar de material triturado.

Tabla 7. Cálculo del Índice del CBR

<b>Fórmula de CBR</b>	
$\% \text{ CBR} = \frac{\text{CARGA UNITARIA DEL ENSAYO} * 100}{\text{CARGA UNITARIA PATRÓN}}$	

Fuente: Braja (2010)

El número CBR, es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero, por ejemplo: 30, 45, 98, etc. Los valores de carga unitaria que se utilizan en la ecuación son:

Tabla 8. Valores de carga unitaria

<b>Penetración</b>		<b>Carga unitaria patrón</b>		<b>Carga estándar</b>
mm	plg	Mpa	lb/plg <sup>2</sup>	lb



2.50	0.10	6.90	1,000	3,000
5.00	0.20	10.30	1,500	4,500
7.50	0.30	13.00	1,900	5,700
10.00	0.40	16.00	2,300	6,100
12.70	0.50	18.00	2,600	7,800

Fuente: Bowels (2002)

El número CBR se basa en la relación de carga para una penetración de 0.1plg. (2.5mm). Si el valor de CBR a una penetración de 0.2plg. (5mm) es mayor, el ensayo debe repetirse. Si en un segundo ensayo se produce nuevamente un valor de CBR mayor de 0.2plg de penetración, dicho valor será aceptado como valor del ensayo. Los ensayos de CBR se hacen sobre muestras compactadas con un contenido de humedad óptimo, obtenido del ensayo de compactación estándar o modificado. ASTM D698 o D1557.

Se preparan tres probetas como mínimo, las que poseen distintas energías de compactación (lo usual es 56, 25 y 10 golpes). El suelo al cual se aplica el ensayo, debe contener una pequeña cantidad de material que pase por el tamiz de dos pulgadas (50mm) y quede retenido en el tamiz de  $\frac{3}{4}$  plg (19mm), se recomienda que esta fracción no exceda del 20%. Antes de determinar la resistencia a la penetración generalmente, las probetas se saturan durante 96 horas, con una sobrecarga aproximadamente igual al peso del pavimento; para simular las condiciones de trabajo más desfavorables. Pero en ningún caso el peso de la sobrecarga será menor de 4.5kg.

Es necesario durante este período tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del período de saturación se hace la penetración para obtener el valor de CBR para el suelo en condiciones de saturación completa. En ambos ensayos de penetración, para determinar los valores de CBR se coloca

una sobrecarga sobre la muestra de la misma magnitud que se utilizó durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos:

- Brindar información sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura.
- Indica la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

El ensayo de penetración se lleva a cabo en una máquina de compresión utilizando una tasa de deformación unitaria de 0.05plg/min (1.27mm/min). Se toman lecturas de carga contra penetración a cada 0.02plg (0.5mm) hasta llegar a un valor de 0.2plg (5.0mm) a partir del cual se toman lecturas con incrementos de 0.1plg (2.5mm) hasta obtener una penetración total de 0.5plg (12.7mm). El ensayo de CBR se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos para utilizarlos como base y sub-rasante en pavimentos de carreteras y aeropistas.

Tabla 9. Clasificación típica para el uso de diferentes materiales

No CBR	Clasificación general	Usos	Sistema de Clasificación	
			Unificado	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Pobre a Regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Regular	Sub-base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-25	Bueno	Base; Sub- base	GM, GC, SW, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Bowels (2002)

El número CBR es un índice del valor o capacidad soporte de un suelo. Un CBR de dos o tres por ciento indicará que el material tiene una capacidad soporte muy baja; otro CBR de 60 ó 70% mostrará un material de buena resistencia, apto para capa de

base de pavimentos. El CBR significa la relación entre la resistencia a la penetración de un suelo y su capacidad soporte como base de sustentación para pavimentos flexibles. La prueba de CBR comprende tres ensayos fundamentales:

- Determinación de la densidad y humedad de la muestra compactada.
- Determinación de las propiedades expansivas del material, porcentaje de hinchamiento (expansión) o “swelling”.
- Determinación de la resistencia a la penetración.

### Suelos arcillosos

Fratelli, 1993, las arcillas son suelos de partículas minerales de menor tamaño que la de los limos, están formadas por partículas cristalinas de minerales que se designan como minerales – arcilla, los cuales son generalmente silicatos hidratados de aluminio (Al), hierro (Fe), magnesio (Mg) y potasio (K). Cuando se produce la descomposición de los silicatos de aluminio complejos como los feldespatos, las micas y los minerales ferromagnésicos, se obtiene sílice, bicarbonato potásico y silicatos de aluminio hidratado. Los suelos arcillosos pueden contener también materias orgánicas coloidales y a veces cristales de cuarzo y otros minerales. Sus partículas tienen forma laminada y de listones alargados, según se indica en la figura

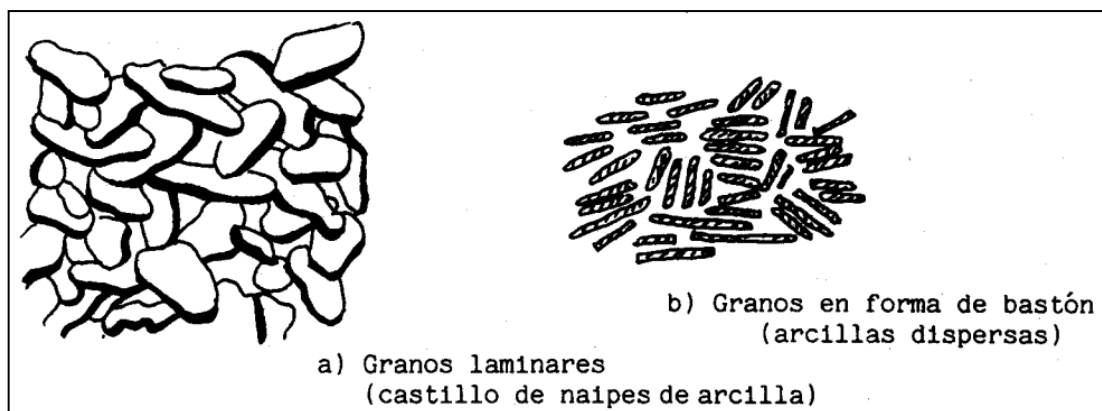


Figura 8. Forma de las arcillas.

Fuente: Fratelli (1993)

Fratelli, 1993, menciona que sus características físicas más importantes son la plasticidad y la resistencia, la cual aumenta gradualmente con la reducción del contenido de humedad. Hay muchos tipos de minerales arcillosos que difieren en su composición, estructura y comportamiento bajo las cargas. Sin embargo, la mayoría de los cristales de arcilla tienen por componentes principales la sílice y las alúminas. Los suelos arcillosos son típicamente cohesivos. La cohesión es la propiedad que tienen las partículas de un suelo de adherirse unas con otras en presencia de humedad, en una combinación de atracción intermolecular, para formar una masa no desintegrable. La cohesión es el resultado de una compleja interacción de fuerzas de atracción y repulsión entre las partículas, actuando como cargas eléctricas con intensidad variable, según la distancia entre ellas. Cuando el contenido de humedad es bajo, las arcillas forman un sólido o semisólido coherente con masa muy compacta. Por ello las aristas de sus partículas se mantienen en contacto. Ello incrementa las cargas eléctricas locales de atracción y el movimiento potencial entre los gránulos se reduce, otorgándole características de plasticidad. Por el contrario, cuando el contenido de humedad aumenta, las partículas en suspensión se alejan unas de otras incrementando su movilidad y creando un sistema disperso que disminuye la fuerza de atracción intermolecular. Todas las fuerzas alrededor de las partículas de arcilla, incluyendo las fuerzas exteriores, deben estar en equilibrio. Si estas aumentan, se expulsa el agua de los conductos capilares formados por los poros interconectados y se reduce el contenido de humedad.

Eso conlleva a un nuevo acercamiento de las partículas y un incremento de los campos electrostáticos, en un proceso reversible que depende del contenido de humedad. El comportamiento estructural de las arcillas puede verse afectado por diversas propiedades físicas y químicas, así como por el tamaño de sus partículas,

la presencia de materiales orgánicos o el contenido de agua. Entre los minerales de arcillas se pueden mencionar:

- La montmorillonita: es la más común y activo de los minerales presentes en las arcillas, con una notable afinidad al agua, ya que sus cristales son capaces de hincharse incrementando notablemente su volumen. Por ello es el principal responsable de la retracción y expansión de los suelos arcillosos. También se le conoce por esmectita y está compuesta principalmente por alúmina y sílice. Se encuentra generalmente en regiones ricas en rocas ferromagnéticas, tales como las volcánicas en zonas cálidas y de lluvias abundantes.
- Fratelli, 1993, la illita: es otro mineral presente en las arcillas, no tan activo como la montmorillonita. Se origina como resultado de la alteración de algunos minerales arcillosos sometidos a cambios ambientales. Las arcillas de origen glacial contienen por lo general grandes cantidades de illinita y presentan una plasticidad relativamente baja.

La caolinita: es el menos activo de los minerales arcillosos. La bentonita contiene alto porcentaje de montmorillonita, por lo cual es muy activa, presentando sodio como base del intercambio de cationes. El límite líquido de la bentonita es del orden de 500%, por lo cual es apta para absorber grandes cantidades de agua. La clorita y la vermiculita son minerales menos comunes en los suelos arcillosos.

### **Estabilización de Suelos**

Marquez, 2005, la estabilización de suelos tiene por objeto procurar por diversos medios la estabilidad de ellos, para cualquier condición de tiempo y de servicio, entendiendo por estabilidad la permanencia en el tiempo de las características mecánicas obtenidas al momento de la construcción. Estos medios o procesos van desde la incorporación a los suelos de materiales o nuevos elementos que

proporcionen estabilidad, hasta la formación de verdaderos mecanismos de defensa contra la acción de las fuerzas climáticas. La estabilización significa entonces, no solo llegar a un estado del suelo con suficiente resistencia a la acción destructora y deformante de las cargas, sino también asegurar la importancia, ya que de su existencia, depende la existencia del primero. Podemos considerar en el caso de los suelos, su estabilidad como resistencia al corte, la que se debe a las siguientes propiedades: fricción interna y cohesión

En un sentido amplio se puede definir la estabilización de suelos, como la combinación y manipulación de suelos con o sin mezclar, para producir una masa firme capaz de soportar el tráfico en todas las condiciones climatológicas.

Si un suelo estabilizado es verdaderamente "inalterable" debe tener suficiente resistencia al cortante para soportar los esfuerzos que le sean impuestos por las cargas de tránsito de toda y en toda clase de climas sin que sufra una deformación excesiva. Además si la mezcla del suelo estabilizado se va a utilizar como una superficie de rodamiento, deberá tener capacidad para soportar los efectos abrasivos del tránsito.

En el diseño y construcción de plataformas se hace énfasis en la utilización eficaz de los materiales locales con el objeto de reducir los costos de construcción. En algunas áreas los suelos naturales no tienen características favorables y requieren de modificaciones, las cuales se lograrían con el uso de elementos minerales adecuados, tales como la grava, piedra triturada o un aglutinante de arcilla.

### ***Características de los Estabilizadores***

De acuerdo a su estado de presentación los estabilizadores pueden ser sólidos (polvo) o líquidos y respecto a su origen, químicos, orgánicos o inorgánicos.

En general estos permiten mejorar las características físico-mecánicas de los suelos como:

- El Índice de Plasticidad de los suelos estabilizados disminuye respecto del Índice de Plasticidad del suelo original y por consiguiente también disminuye su Límite Líquido.
- Los estabilizadores hacen que la Densidad Seca Máxima del suelo aumente.
- El C.B.R. aumenta después del tratamiento en cantidades porcentuales significativas.

### ***Tipos de estabilizaciones***

- Marquez, 2005, menciona que la estabilización mecánica: Comprende el manipuleo y compactación de los suelos para obtener su densificación. La estabilización mecánica de un material consiste en ganar capacidad portante en el material recurriendo a ciertas modificaciones en él sin necesidad de incorporar agentes externos que modifiquen sus orígenes o naturaleza.

La capacidad portante significa conferir al suelo la capacidad de resistir las cargas exteriores que se le aplican sin que se produzcan fallas como rotura o deformaciones excesivas. Este mejoramiento generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas

Estabilización física: Persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez, al primitivo suelo, a esta mezcla de suelos se le conoce como la estabilización granulométrica por sí sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento. Los suelos de grano grueso como las gravas y 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 en 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 da 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. En la composición de los materiales intervienen diferentes fracciones granulométricas como grava, arena, limo y arcilla. Cada una de estas fracciones deberá ser compactada alcanzando su máxima densidad. Es decir que dentro de esta mezcla las partículas más gruesas suministran fricción y resistencia al impacto, las intermedias acuanamiento de la estructura y las más finas el sostén de delgadas películas de agua, que desarrollan una fuerte cohesión.

REVESTIMIENTO ESTABILIZADO	
AGREGADO GRUESO	De 25 a 2mm suministra al conjunto fricción y dureza resistencia al impacto y al desgastes.
Mortero del Suelo	Agregado Fino <u>ARENA GRUESA</u> Fricción y dureza(similar a la grava y agregado grueso) entre tamices 10 y 40 <u>ARENA FINA</u> Sirve para el acuanamiento de material grueso entre tamices de 40 y 200
	<u>LIMO</u> 50 a 5 u actúa como relleno para impedir el movimiento de las partículas gruesas
	Limo y arcilla <u>ARCILLA</u> Menor de 5u suministradas poros diminutos de modo que las películas de agua sean suficientemente delgadas para que produzcan alta cohesión
Revestimiento estabilizado	Agregado Grueso De 25 a 2 mm, suministra al conjunto fricción dureza, resistencia al impacto y al desgaste
	Mortero del suelo Agregado Fino Arena gruesa: Fricción y dureza (similar a la grava y agregado grueso). Entre tamices 10y 40 Limo y Arena Fina: Arcilla

**Figura 9.** Esquema de la estabilización física (Marquez, 2005)



Marquez, 2005, menciona que el Manual de diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito la estabilización granulométrica consiste en mezclar dos o más suelos para obtener un material de características admisibles para ser usado como subrasante o afirmado.

Los afirmados, obtenidos de depósitos naturales de material (agregados de cantera de cerro o de río), que tienen gradación ideal, donde el material sin procesar se puede utilizar directamente, por lo que será necesario zarandear el material para obtener la granulometría especificada.

Es un mezcla de tres tamaños o tipos de material: piedra, arena, y finos o arcilla. Si no existe una buena mezcla de estos tres tamaños, el afirmado será pobre.

Las propiedades de un suelo estabilizado granulométricamente se controlan con ensayos de laboratorio sencillos como la determinación de la distribución granulométrica (tamizado) del límite líquido y del límite plástico.

Para suelos granulares y finos, se utilizará el ensayo AASHTO T27 (ASTM C136), en el ensayo AASHTO T11 para materiales finos obtenidos por lavado sobre la malla N°200 (ASTM C117) si se espera tener una mezcla con apreciable cantidad de material que pasa por la malla N°200 se podrá utilizar el ensayo AASHTO T88 (ASTM D422). El afirmado debe cumplir con la siguiente granulometría

Tabla 10: Granulometría del afirmado

Porcentaje que pasa por el tamiz	Trafico to y t1 tipo 1	TRAFICO T2	TRAFICO T3
	IMD 50 VEH	TIPO 2	TIPO 3
		S1-100 VEH	101-200 VEH
50mm	100	100	
37.5mm		95-100	90-100
25mm(2)	50-80	75-95	90-100
19mm(2)			65-100
12.5mm(2)			
9.5mm(2)		40-75	45-80
4.75mm(2)	20-50	30-60	30-65
2.36mm			
2.00mm		20-45	22-52
4.25mm		15-30	15-35
75um		5-15	5-20
Índice de plasticidad	4-9	4-9	4-9

Fuente: Ministerio de transporte y comunicaciones (2012)

- Marquez, 2005, menciona que la estabilización química es el cambio de las propiedades del suelo por efectos químicos de la superficie mediante la adición de cementos orgánicos e inorgánicos y materiales impermeabilizantes. Se utiliza ciertas sustancias químicas patentizadas su uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Hay diferentes materiales para realizar este tratamiento, que en general son de tipo industrial, siendo los principales:  
Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económico.

Cemento Portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

Cloruro de Sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Cloruro de Calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Escorias de Fundición: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Hule de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil

### **Estabilización Química**

La Norma Técnica de Estabilizadores Químicos MTC E 1109 – 2004 (11), 2011, indica que la estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, genéricamente denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar íntima y homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto. La aplicación de un estabilizador químico tiene como objetivo principal transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio. Los estabilizadores químicos consideran una amplia variedad de tipos, entre los cuales se encuentran sales, productos enzimáticos, polímeros y subproductos del petróleo. Los estabilizadores químicos pueden tener efectos sobre una o varias de las propiedades de desempeño del suelo, de acuerdo al tipo específico y condiciones

de aplicación del estabilizador químico, así como del tipo de suelo tratado.

### ***Estabilización con Sales (Cloruros)***

La Norma Técnica de Estabilizadores Químicos MTC E 1109 – 2004 (11), 2011 menciona que en algunas ocasiones se emplea los cloruros en la elaboración de mezclas de suelos agregándose con el objeto de hacer expedito el proceso de compactación, haciendo más lenta la velocidad de evaporación de la humedad de la mezcla durante la compactación.

La incorporación de pequeñas cantidades de cloruro producirá en muchas ocasiones un incremento en la densidad con un esfuerzo dado.

El cloruro es un material higroscópico, es decir posee la capacidad de atraer la humedad del aire y de otras partes, causando en algunas ocasiones demasiada presencia de humedad haciendo la superficie jabonosa. En la construcción y mantenimiento de plataformas se utilizan dos tipos de cloruros:

- Cloruros en granos regulares (tipo 1) el cual contiene un mínimo de 77% de  $\text{CaCl}_2$  debiendo agregarle en una proporción de 10 a 15Kg / m<sup>3</sup>
- Cloruros en hojuelas, pelotillas o diluido es de 5 a 10Kg / m<sup>3</sup>.

Debemos tener en cuenta que es necesario tener el material adecuado con la granulometría y plasticidad para poder aplicar dicha combinación, de ser necesario incorporar material de préstamo para cubrir los requerimientos técnicos

### ***Estabilización con Cal***

La MTC, 2000, menciona que la Cal hidratada es un agente estabilizador cuando tenemos arcillas muy plásticas podemos disminuir su plasticidad y consecuentemente los cambios volumétricos de la misma asociados a la variación de los contenidos de humedad.

Este es un método económico para disminuir la plasticidad de los suelos y darle un aumento en la resistencia. Los porcentajes por agregar varían del 3 al 6% con

respecto al suelo seco del material para estabilizar, con estos porcentajes se consigue estabilizar la actividad de las arcillas obteniéndose un descenso en el índice plástico y un aumento en la resistencia.

Durante su proceso constructivo se debe considerar agregar el agua necesaria y un curado de hasta 48 horas de acuerdo con el tipo de arcilla de que se trate

### ***Estabilización Suelo Cemento***

La MTC, 2000, menciona que 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 de calcio que por su gran afinidad con el agua roban algunas de las moléculas de ésta 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.

Este tipo de estabilización consiste comúnmente en agregar cemento Portland en proporción de un 9% en peso del suelo seco.

Se debe considerar el tiempo de fraguado de 48 horas para evitar fisuras así permitir el ingreso de agua a la base

### ***Emulsiones enzimáticas***

Kestler, 2009, muchas de las emulsiones para la supresión de polvo y/o estabilización de los suelos son de propiedad sobre la naturaleza y de composición exacta y los mecanismos de estabilización no son públicamente disponibles, por lo tanto, a menudo es difícil clasificar por grupos las distintas emulsiones con precisión. Las Emulsiones enzimáticas contienen enzimas (moléculas de proteínas)

que reaccionan con las moléculas del suelo para formar un enlace de cementación que estabiliza la estructura del suelo y reduce la afinidad del suelo por el agua. Categóricamente hablando, las emulsiones enzimáticas trabajan en una variedad de suelos, siempre y cuando una mínima cantidad de partículas de arcilla estén presentes. Cuando se aplica a bajas dosis de aplicación a la superficie del camino sin consolidar, las emulsiones enzimáticas funcionan bien para suprimir el polvo. Se enlazan las partículas del suelo y así reducen la generación de polvo. A tasas de aplicación mayores, las emulsiones enzimáticas se pueden utilizar para estabilizar los suelos. Cuando se aplica y es compactado adecuadamente, el suelo tratado puede ser estabilizado para formar una densa capa dura, resistente al agua, la capa superior se puede utilizar como un revestimiento de carreteras.

La mayor parte de la información disponible sobre las emulsiones enzimáticas viene de folletos y publicaciones proporcionado por el fabricante. Por lo tanto, puede ser difícil de encontrar información de una prueba independiente para un producto en particular. El rendimiento y la aplicación de las emulsiones enzimáticas pueden variar de un producto a otro. Además, los productos suelen ser reformulados de modo que, estudios de casos anteriores ya no puede ser representado en un producto actual. Como resultado, el producto especifica las pruebas y o verificación de su rendimiento para la selección de la emulsión enzimática.

- Aplicación: uso típico supresor de polvo, estabilizador del suelo.
- Rango de Tráfico: Muy bajo a bajo (IMD <250).
- Tráfico: la frecuencia de aplicación obligatoria se incrementará con el aumento del tráfico pesado (camiones) o el aumento de velocidad del vehículo.

Restricciones adicionales de carga de tráfico puede ser necesaria en función del material que está siendo tratado; por ejemplo, la capacidad de carga de un suelo arcilloso es generalmente mucho menos que el de un suelo con material granular

## **Estabilizador TerraZyme**

Rollins, 1998, TERRAZYME es un producto basado en la fermentación de enzimas biológicas y se usa para aumentar y mantener la estabilidad de los suelos: El producto es una formulación especial líquida de enzimas orgánicas, que actúa como catalizador para aumentar el grado de aglutinamiento y compactación de las partículas componentes de los suelos. Es una formulación natural no tóxica de enzimas que altera las características físicas y químicas del suelo, permitiendo una mayor densidad de compactación y aumentando la estabilidad del suelo por una unión más estrecha de las partículas del mismo.

La aplicación de TERRAZYME logra un óptimo comportamiento estructural en gravas arcillosas que contengan la plasticidad necesaria para una buena cohesión. Aumenta la capacidad de soporte y reduce significativamente el polvo y la formación de enclaminados. Esto se debe a que las enzimas actúan como catalizador por sus cationes orgánicos, los cuales rompen los enlaces de los aniones ionizados del suelo. Se produce un intercambio catiónico en la estructura de la arcilla y se crea un proceso de cementación acelerado por el efecto enzimático del producto.

El proceso constructivo es sencillo ya que no requiere de equipo adicional del convencional, solo es necesario tener en cuenta la graduación y plasticidad. La apertura al tránsito es a las 4 horas dependiendo de las condiciones del clima.

Rollins, 1998, TerraZyme, es una alternativa para la estabilización de carreteras su formulación líquida enzimática natural, no tóxica y biodegradable mejora la calidad de las obras de ingeniería. Cataliza la degradación de los materiales orgánicos en el suelo alterando favorablemente sus atributos físicos y químicos. Dando como resultado una mejor unión química de partículas cohesivas de suelo y una estructura de suelos más estable y duradera. Los suelos tratados alcanzan alto porcentaje de compactación con menos esfuerzo mecánico. El incremento de la densidad mejora la unión entre las partículas otorgándole mayor resistencia a la deformación de

caminos, a la migración ascendente de las partículas finas y a la penetración de agua. Su uso en la construcción y reparación mejora notablemente el rendimiento y la durabilidad de los caminos de tierra

### ***Reacción con el Suelo***

Es un aditivo para suelos elaborado a partir de extractos de plantas naturales mediante el uso de la fermentación. La formulación final contiene productos de un proceso metabólico microbial, incluyendo enzimas.

Las moléculas interactúan con las partículas cohesivas del suelo para mejorar los límites de solidez en el tiempo. El proceso reduce la permeabilidad y plasticidad en suelos arcillosos, elimina el agua e incrementa los límites de solidez entre las partículas cohesivas. Este incremento de límites ayuda a estabilizar los suelos reduce el daño y deformación que generalmente se produce como resultado de determinadas condiciones húmedas de los suelos. El incremento de la densidad y solidez de los suelos tiene un importante impacto en la performance de las carreteras.

Es un catalizador eficaz que acelera y fortalece la unión del material de la base del camino. Crea una base más densa, cohesiva y estable, cuya resistencia a la compresión aumenta con el tiempo.

### ***Características***

- Alto rendimiento y bajo costo.
- Usa equipo normal.
- Aplicable aún en suelos de muy baja calidad.
- Es 100% natural.
- Compatible con el medio ambiente.
- Ecológico: No tóxico y Biodegradable.
- De manejo seguro.
- No inflamable.

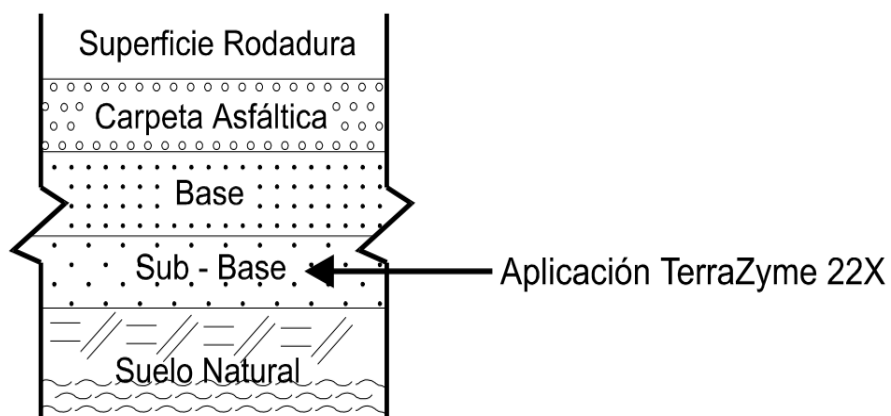


### **Áreas de aplicación**

- En la construcción y rehabilitación de carreteras, caminos de tierra, caminos secundarios, áreas de control de erosión y otros.
- Tratamiento de sub-base antes de asfaltar caminos primarios, áreas de estacionamiento y pistas de aeropuertos.
- Lugares de ambiente ecológico sensibles, plantaciones, parques, senderos y otros.
- Estabilizador contra erosión y escurrimiento de bermas de caminos, canales y acequias.
- Complemento de relleno en reparaciones de caminos y baches.
- Sellador de fondos de lagunas, tanques y rellenos sanitarios.

### **Estrato de pavimentos aplicables**

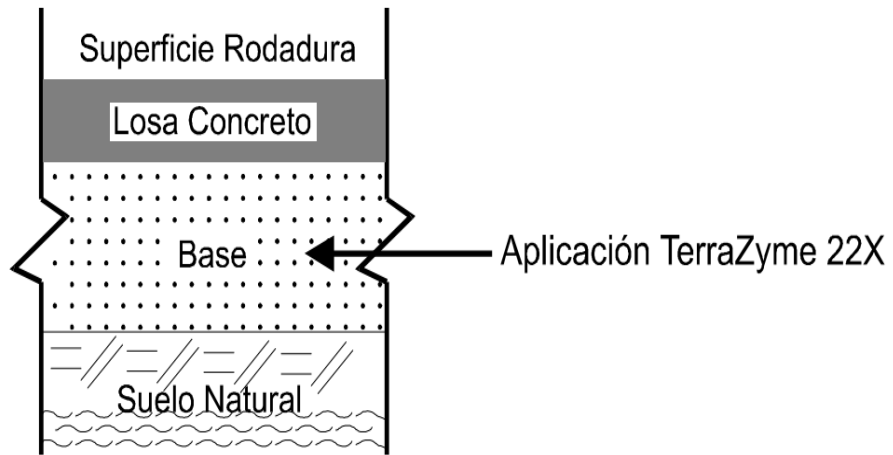
- Carreteras de 1º y 2º categoría con carpeta asfáltica, losa de concreto y tratamiento bi o mono capa.



**Figura 10.** Carretera de 1º y 2º categoría

Fuente: Rollins (1998)

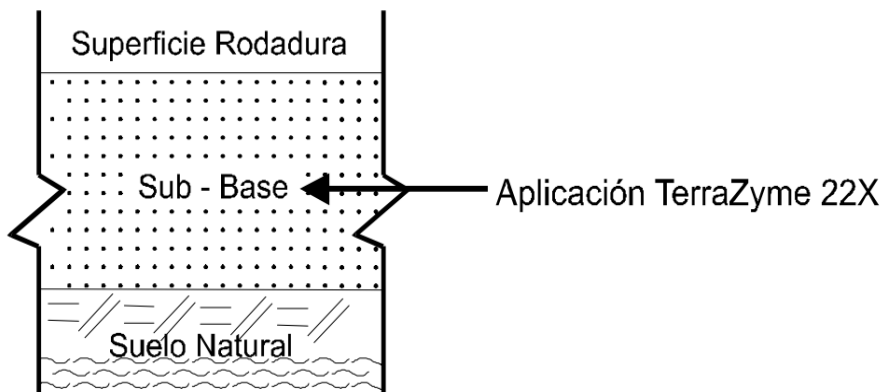
- Pavimentos con losas de concreto.



**Figura 11.** Pavimento con losa de concreto

Fuente: Rollins (1998)

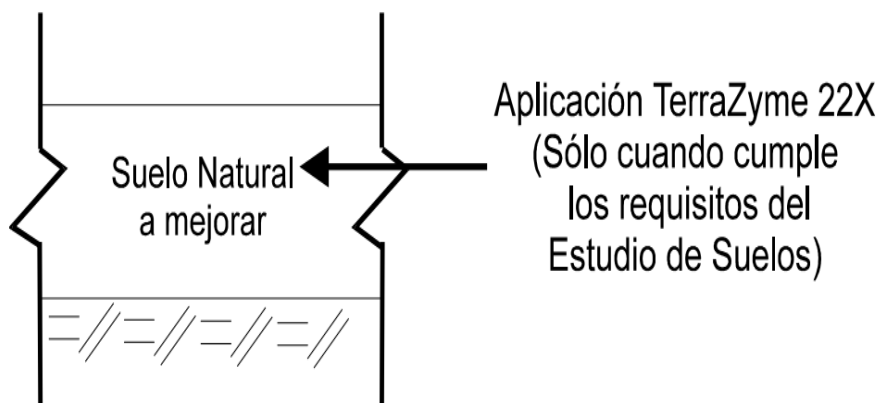
- Carreteras rurales, trochas, etc.



**Figura 12.** Carreteras rurales

Fuente: Rollins (1998)

- Carreteras a mejorar sin acarreo, trochas carrozables.



**Figura 13.** Carreteras sin sub base  
Fuente: Rollins (1998)  
**Rollins, 1998, Ventajas de TerraZyme**

- Alto rendimiento y bajo costo de mantenimiento en caminos de tierra en variadas condiciones climatológicas.
- Reduce el mantenimiento de caminos, aumenta la estabilidad disminuyendo la penetración de agua en la base del camino. Reduce los efectos de ondulaciones, encalaminado y baches, dando mayor tiempo de vida útil y menor costo de mantenimiento, incluyendo a los vehículos.
- Se puede usar material de menor calidad, reduciendo la necesidad de importar material, al usar material del propio suelo, se puede usar finos cohesivos no granulares, de menor calidad que se encuentran en el camino entre 10 y 15cm. de profundidad. Puede usarse materiales menos costosos, con más contenido de finos (20-30% pasando por malla N°200).
- Requiere el mismo equipo que se utiliza en la construcción de carreteras con menor esfuerzo que se realiza para operaciones normales de recubrimiento de superficies. El único paso diferente en la operación de escarificado y nivelación es agregar el producto, con suficiente agua para mojar todas las partículas del suelo y obtener la humedad óptima para la compactación.

- Aumenta la resistencia de la compresión, es un catalizador orgánico y fortalece la unión del material de la base del camino. Crea una base más densa, cohesiva y estable. La resistencia de la compresión aumenta con el tiempo.
- Mejora la capacidad del camino de soportar carga (%CBR), la integridad estructural de la base del camino con el tiempo aumenta la capacidad para soportar carga (CBR). Extendiendo la vida útil del camino.
- Reduce el esfuerzo de compactación y hace más fácil trabajar el suelo, incrementando la lubricación de las partículas del suelo. Hace el suelo más fácil de nivelar y permite que se logre la densidad deseada con menos pasadas del compactador (rodillo).
- Aumenta la densidad del suelo cambiando la atracción electro-química en las partículas del suelo y liberando agua retenida, ayudando a disminuir los vacíos entre las partículas del suelo. Se produce así una fundación del camino más firme, seca, densa y con menos polvo.
- Disminuye la permeabilidad de agua de suelos más cohesivos inhiben el escurrimiento y migración del agua que generalmente se produce a través de los vacíos que existen entre las partículas.
- El Estabilizador reacciona a cambios bruscos de temperatura y en zonas lluviosas en alturas y la acción de las heladas.

### ***Especificaciones Técnicas de TerraZyme***

Tabla 11. Especificaciones técnicas de TerraZyme

<b>ASPECTO</b>	<b>TerraZyme</b>
Tecnología	Sistema enzimático
Efecto en la estructura mineral de la arcilla	Reduce la plasticidad y permeabilidad, incrementa la densidad y CBR.
Características y comportamiento	Reacciones e intercambio iónico, electroquímico con las partículas de la arcilla; reducción de tensión superficial; degradación enzimática del material orgánico en el suelo.
Naturaleza	Tecnología de fermentación de vegetales. Líquido.

Rango	Amplio rango de suelos naturales incluyendo materiales con alto contenido arcilloso cohesivo.
Aplicación	Los requerimientos de aplicación son mínimos, es de fácil aplicación. Construcción económica. Aplicación manual, basada en una buena mezcla de suelo, suficiente dilución en agua del producto y una adecuada compactación. Moderado PI; especificado (<20). El suelo puede contener material orgánico.
Rendimiento	Un Bidón de 20Lts. Rinde para 660m <sup>3</sup> , con un largo de 1100m, ancho de 4m, y espesor de 15cm. Rinde 1 Lt. para 220m <sup>2</sup> ó 1 Lt. sirve para 33m <sup>3</sup> .
Fabricante	NATURE plus, Inc. (USA) Presentación: Bidones de 20Lts.
Vencimiento	48 meses, contados desde la fecha de su fabricación.
Medio ambiente	Ecológico. No tóxico, biodegradable.
Propiedades a 25 °C	PH = 4 – 9 Gravedad específica = 1,0-1,10 Color = Marrón claro, viscosidad, CPS = 20 Olor = Inodoro
Test de laboratorio y evaluación	Análisis usuales durante la pre - construcción: Granulometría del suelo, límite líquido e índice de plasticidad, PH, Humedad natural, Ensayo Proctor. DCP/CBR y medidas de densidad en carreteras tratadas, para establecer el incremento de compactación con respecto al tiempo. Las condiciones en el campo y resultado se simulan en el laboratorio

Fuente: Rollins (1998)

### Proceso químico del estabilizador con la arcilla

- Sistema típico de arcilla agua, los cationes cargados positivamente se sitúan alrededor de la lámina de arcilla cargados negativamente.

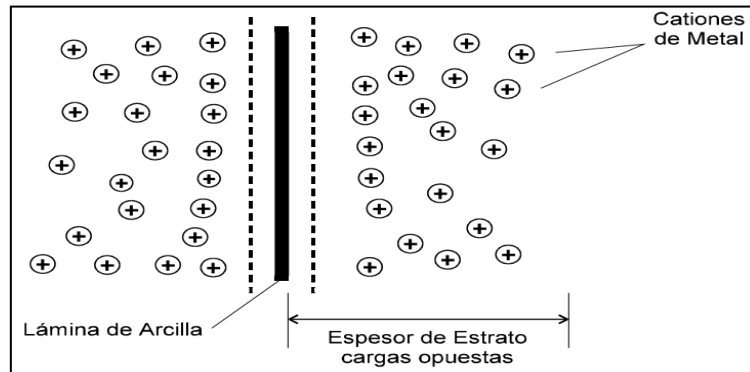
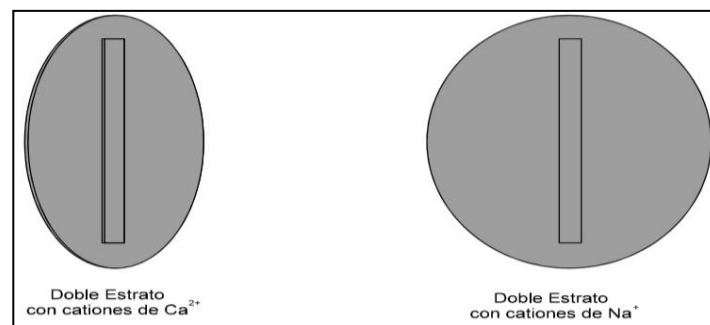


Figura 14. Proceso químico del estabilizador TerraZyme

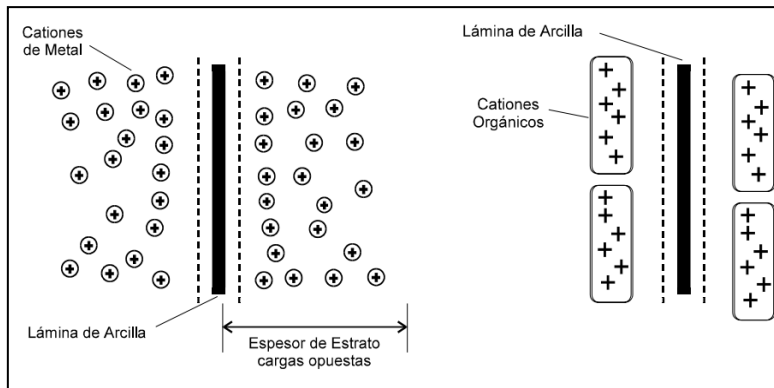
Fuente: Rollins (1998)

- Reducción de ambos estratos alrededor de lámina de arcilla cuando los cationes de sodio  $\text{Na}^+$  son reemplazados por los cationes de Calcio  $\text{Ca}^{2+}$ .



**Figura 15.** Reducción de los estratos alrededor de la lámina de arcilla  
Fuente: Rollins (1998)

- La lámina de arcilla se cubre con cationes orgánicos reduciendo el espesor del estrato por las cargas opuestas.



**Figura 16.** Lámina de arcilla con cationes orgánicos  
Fuente: Rollins (1998)

### **Resultados de la Aplicación**

Rollins, 1998 , menciona que los resultados óptimos en la estabilización se dan, cuando el suelo se mezcla completamente con la solución considerando las especificaciones de diseño. Los procedimientos de aplicación apropiados son críticos para asegurar la mejor estabilización y la performance de la carretera.

- Granulometría: método de ensayo: ASTM E-11, D-422 o análisis de graduación similar. TerraZyme cataliza las reacciones con finos cohesivos (plásticos). Los finos pasan la malla N°200 y deben de constituir por lo menos el 15% del material de construcción. La arcilla cohesiva deberá estar presente en un 6% como mínimo.
- Plasticidad: método de ensayo: ASTM D-4318 (límites Atterberg). Suelos ideales tratados con TerraZyme deberán tener un límite líquido (LL) menor que 30% y un índice plástico (IP) entre 5% a 18%.
- PH: método de ensayo, según instrucción del fabricante, para cada equipo. Un suelo con PH de 4,5-9,5 es el mejor. Suelos con PH bajos pueden tratarse con carbonato de calcio (cal). Suelos con alto PH se podrán tratar con sulfato de sodio, sulfato de magnesio o ácido muriático. TerraZyme concentrado tiene un PH de 3,2-5,1.

- Humedad Natural: el porcentaje de humedad natural del suelo a usarse servirá para determinar los rangos y diluído del aditivo con agua y el riego para el óptimo.
- Máxima Densidad Seca/Optimo contenido de humedad (OCM). Método de ensayo: ASTM D-1557 Próctor modificado. Aplicar TerraZyme con relación a 0,15; 0,20; 0,25; y 0,30ml/kg. Para muestras de ensayo y determinar la relación de aplicación específica al suelo para obtener buenos resultados. El tratamiento con TerraZyme reduce el OCM de 1%-2% e incrementa la densidad del suelo.
- California Bearing Ratio (CBR): método de ensayo: ASTM D-1883. El ensayo mide la resistencia del suelo a la carga. Esto muestra el incremento de la carga en suelos tratados con TerraZyme a niveles recomendados para compararlos con suelos no tratados. Los ensayos de CBR en seco representan mejor las condiciones de campo. Cuando se requiera una prueba húmeda, es necesario que las muestras tratadas se curen antes de sumergirlas en agua. Las pruebas de campo se ensayarán a las 14 semanas para determinar el incremento de la resistencia.
- Permeabilidad: método de ensayo: ASTM D-5084. Se reduce la penetración de humedad debido al tratamiento con TerraZyme, lo que impactará favorablemente la performance y resistencia de la carretera. En suelos tratados se esperan reducciones de más de 50 veces, con respecto a los no tratados.

### ***Aplicación del TerraZyme***

Rollins, 1998, la aplicación más de TerraZyme se realiza durante el afirmado de carreteras, donde se presentan ondulaciones, baches, diques, etc.

Demostraciones exitosas y su correspondiente aplicación en muchas partes del mundo han permitido acumular valiosas experiencias respecto a los tipos



adecuados de los suelos, su química, requerimiento de equipos y máquinas, así como métodos de aplicación del producto para obtener el mejor éxito.

- Rendimiento: La relación de dosificación es de 1Lt. de TerraZyme por 33m<sup>3</sup> de material. El rango de dilución en agua es de 1:500 a 1:2000, dependiendo del tipo del suelo y lo seco que éste se encuentre.

Suelos Secos            1/2000

Suelos Húmedos        1/500

Equipos para la aplicación. Motoniveladora o escariadora (120HP) que sirva para romper la superficie del camino, pudiendo ser reemplazado eventualmente por un arador rotatorio (2m), Camión o carro cisterna para agua, de 9500 a 19000 litros o 2500 a 5000 glns. De capacidad, con toberas de riego, Rodillo de tambor liso, con un peso de 8 a 12ton. , para una efectiva compactación. Si el suelo presenta un alto contenido de arcilla, usar un compactador de "pata de cabra". Un rodillo neumático, de 10 a 15 toneladas puede reducir la adhesión del suelo a las superficies de la llanta en suelos muy cohesivos.

Los caminos adecuados para la demostración de TerraZyme, se escoge de preferencia, secciones alrededor de 100 metros para establecer con mayor precisión la dosificación adecuada, previamente se habrá calculado las condiciones de contenido de humedad del suelo. Para asegurar el éxito de caminos antes de la aplicación de TerraZyme, use la información y los procedimientos establecidos para tal efecto.

Las aplicaciones más exitosas se dan en suelos que contienen un rango completo de tamaños de partículas, y una distribución pareja, desde gruesos capaces de soportar las cargas del tráfico hasta los finos cohesivos.

Demostraciones de este tipo se pueden realizar en un día, proporcionando un valioso entrenamiento y una singular experiencia, lo cual permite a los interesados presenciar la operación y obtener información del rendimiento de TerraZyme

comparando secciones tratadas con secciones sin tratar. La observación cuidadosa, así como el conocimiento de las condiciones del suelo antes, durante y al final de la demostración, de parte de los observadores, será muy valiosa cuando en la práctica se aplique los procedimientos aprendidos. (Rollins, 1998)

Se ha encontrado que en las aplicaciones más exitosas de TerraZyme han tenido lugar en suelos que contienen un rango completo de tamaños de partículas, así como una distribución pareja de ellas, desde gruesos capaces de soportar las cargas del tráfico hasta los finos cohesivos. Arena de playa y roca triturada no han demostrado ser materiales adecuados cuando se les usa sin agregar ripio y material fino. Es muy importante hacer un buen análisis del suelo para calificar con mayor precisión los suelos que se encuentran en condiciones de alcanzar la máxima

### ***Procedimiento***

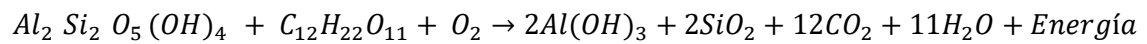
- Rompa, escarifique y pulverice el camino hasta una profundidad de 15cm. Si se requiere agregar más material (gruesos, finos o arcilla) hágalo antes de escarificar. Trabaje y mueva al material suelto hasta que esté bien pulverizado, a una profundidad total de 15cm, para asegurar la penetración completa y distribución pareja del tratamiento líquido. Retire las piedras mayores de 10cm.
- Calcule la cantidad de agua requerida para que el suelo alcance una humedad óptima para su compactación. La cantidad de agua calculada en este paso será mezclada en el camión tanque con el volumen previsto de TerraZyme. La solución se aplicará al camino antes de ser mezclado y compactado. TerraZyme libera el agua retenida en el suelo. El agua utilizada para estimar los requerimientos de humedad debe contener una parte de concentrado de TerraZyme, en 500 partes de agua (dos mililitros de concentrado de TerraZyme en un litro de agua).

- Calcule el volumen de concentrado de TerraZyme que se utilizará para estabilizar un determinado volumen de material. La relación es de un litro de TerraZyme por 33m<sup>3</sup> de material a compactar.
- Combine en un camión cisterna el volumen de concentrado de TerraZyme con 90% del volumen de agua. TerraZyme se mezclará fácilmente con el agua. Esparcir la carga total de la formulación diluida de TerraZyme, contenida en el camión, en varias pasadas uniformes sobre la sección preparada para permitir la penetración total de líquido. Esta mezcla se requiere para llevar al suelo a la humedad óptima y a la distribución uniforme de TerraZyme antes de ser compactado. Mezcle bien la formulación de TerraZyme con el suelo. Después de mezclar totalmente el suelo mediante el uso de la motoniveladora, compruebe que tenga suficiente contenido de humedad. Para ello tome muestras del suelo en forma de bolas, en varios lugares a lo largo del camino (estimación en el campo del grado de humedad óptima). Agregue hasta un diez por ciento de agua sin TerraZyme, si fuera necesario y vuelva a mezclar en suelo.
- Disperse el suelo tratado con TerraZyme en capas de espesor uniforme previo a la compactación. Siga los métodos tradicionales para darle la curvatura y escurrimiento de agua necesaria al camino.
- Compacte la capa tratada con un rodillo normal.

La resistencia de los campos con TerraZyme aumenta gradualmente durante las primeras 14 semanas bajo condiciones moderadas de clima y suelo. El camino nuevo puede ser usado para el tráfico liviano inmediatamente después de realizada la compactación, de ser necesario. Para uso más pesado, los mejores resultados se han logrado después de un período de curado de 2 a 3 días.

## REACCIÓN QUÍMICA ENTRE LA ARCILLA Y LA EMULSION

La caolinita es un compuesto no metálico que, al reaccionar con la sacarosa, en presencia de una enzima específica, genera hidróxido de aluminio o gibbsita el cual es un compuesto bastante aplicado como coagulante en el tratamiento de aguas, también se forma óxido de sílice u óxido de silicio, componente muy útil por su resistencia al calor y, también se obtuvo gas carbónico y agua, la reacción es la siguiente



La alúmina y la sílice permite obtener un índice de plasticidad bajo en construcciones civiles porque permite una gran resistencia a las presiones y el aglutinante generado por la gibbsita o hidróxido de aluminio también.

### 2.3. Marco conceptual

#### Ensayo de laboratorio: Propiedades del Suelo

Análisis Granulométrico	MTC E 107-2000; AASHTO: T 88	ASTM D 422;
Humedad Natural.	MTC E 108-2000;	ASTM D 2216
Clasificación de suelos	AASHTO Y SUCS	
Determinación del límite líquido	MTC E 110-2000; AASHTO T 89.	ASTM D 423, D 4318;
Determinación del límite plástico	MTC E 111-2000;	ASTM D 423, D 4318; AASHTO T 90.
Próctor modificado	MTC E 115-2000;	ASTM D 1557
California Bearing Ratio (CBR)	MTC E 132-2000;	ASTM D 1883; T 193

### 2.4. Definición de términos básicos

Fratelli, 1993, establece que la arcilla es un suelo o roca sedimentaria constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura.

Terrazyme, 2014, establece que el estabilizante de suelo.- Producto químico, natural (a base de enzimas) o sintético, que por su acción y/o combinación con el suelo, mejora una o más de sus propiedades de comportamiento.

Diaz & Mejia, 2004, Estabilización Mecánica.- Proceso cuyo objetivo es mantener o mejorar el comportamiento del suelo como material de construcción para carreteras mediante el uso o la mezcla con otro u otros suelos.

Vivar, 1995, Superficie De Rodadura.- Superficie final de una carretera por donde transitarán los vehículos, incluye la calzada y las bermas.

Braja, 2010, CBR (california bearing ratio): Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial (24) valor relativo de soporte de un suelo o material, que se mide por la penetración de una fuerza dentro de una masa de suelo.

Compactación: Real Academia Española (33) acción y Dosificación: Real Academia Española (35) de dosificar. Dividir o graduar las dosis de un medicamento. Graduar la cantidad o porción de otras cosas.

Rollins, 1998, TerraZyme: es un aditivo para suelos elaborado a partir de extractos de plantas naturales mediante el uso de la tecnología de fermentación. La formulación final contiene productos de un proceso metabólico microbial, incluyendo enzimas.

## **CAPÍTULO III**

### **PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis:**

La utilización del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante incrementa de 30% a más la capacidad de soporte del terreno sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca-Huacariz.

#### **3.2. Variables/categóricas**

##### **3.2.1. Variable de independiente :**

Capacidad de soporte del suelo

##### **3.2.2. Variable dependiente:**

Porcentaje del aditivo de terrazyme en la estabilización de suelos

### 3.3. Operacionalización/categorización de los componentes de la hipótesis.

**Título: Efecto Del Aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona de expansión de la ciudad de Cajamarca.**

Hipótesis	Definición conceptual de la variables /categorías	Definición operacional de las variables categorías			
		Variables categóricas	Dimensiones factores	Indicadores cualidades	Fuente o instrumento de recolección de datos
<b>La utilización del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante incrementa de 30% a más la capacidad de soporte del terreno sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca-Huacariz.</b>	Capacidad de soporte de terreno	Determina la resistencia de los suelos de fundación	CBR	%	Antecedentes de investigaciones anteriores, artículos científicos, pesquisas y otros.
	Aditivo de terrazyme en la estabilización de suelos	Es un aglomerado relativamente poco cohesivo compuesto por minerales, materia orgánica y/o sedimentos que se encuentra por encima de un substrato rocoso.	Clasificación AASTHO	Grupos	
			Granulometría	%	
			Limites Attemberg	%	





## **CAPÍTULO IV**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **4.1. Ubicación Geográfica**

Pulgar V, 1946 menciona que el departamento de Cajamarca se encuentra ubicado en la zona norte del país, en la cadena occidental de los Andes y abarca zonas de sierra y selva. Limita con el norte con Ecuador, por el sur con La Libertad, por el este con Amazonas y por el oeste con Piura y Lambayeque. Tiene 13 provincias y 126 distritos.

Tiene una extensión de 33,248 kilómetros cuadrados y su población 1'332,483 habitantes.

Su capital es la ciudad de Cajamarca, situada sobre los 2,719 msnm, en un hermoso y fértil valle enmarcado por coloridos paisajes, sinfonía de verde,

La región Quechua (del quechua qhichwa, 'zona templada') es una región templada, que se encuentra presente a ambos lados de la cordillera de los Andes en el Perú y se ubica entre los 2300 y los 3500 msnm en los Andes peruanos.

Pulgar V, 1946 menciona que el clima es templado y seco, por lo que en el día y la noche, las temperaturas son drásticamente distintas. La temperatura media fluctúa entre los 11 °C y los 17 °C. El ambiente templado permite el crecimiento de una gran variedad de especies vegetales. La temporada de lluvias es de diciembre a marzo.

#### **4.2. Diseño de la investigación**

En la presente tesis, se determinó la influencia que presenta el aditivo Terrazyme a dosificaciones de 10, 20, 30, 40 y 60 ml por metro cúbico de material, sobre el suelo de fundación de la zona sur este de expansión Huacariz – Cajamarca, para lo cual se desarrolló el siguiente trabajo:

- Evaluación y selección de los pozos de exploración (calicatas)
- Excavación, registro y muestreo de los pozos de exploración.
- Se ejecutó 7 CBR patrón, luego se desarrolló 5 CBR por cada calicata a diferentes dosificaciones de 10, 20, 30, 40 y 60 ml por metro cúbico de material, dando un total de 42 CBR

Para el logro de estos objetivos se recopiló la información mediante los resultados obtenidos en la exploración geotécnica, realizándose los ensayos correspondientes en el laboratorio de mecánica de suelos del Ing. Wilfredo Fernández Muñoz, siguiendo las normas A.S.T.M. y A.A.S.H.T.O. y son los siguientes:

- Análisis granulométrico por tamizado: AASHTO T 88
- Límite líquido : AASHTO T 89 ASTM D 4318
- Límite plástico : AASHTO T 89 ASTM D 4318
- Ensayo de Contenido de Humedad : AASHTO T 265 ASTM D 2216
- Próctor Modificado : AASHTO T 180 ASTM D 1557
- California Bearing Ratio (CBR) : AASHTO T 193 ASTM D 1883

#### **4.3. Método de investigación.**

Teniendo en cuenta el propósito de la investigación es una investigación Inductiva, experimental y descriptiva.

Inductiva porque se ha realizado observación, análisis y clasificación de las muestras del suelo, que han sido debidamente registradas, los resultados obtenidos han ayudado a validar la hipótesis.

Experimental porque se ha manipulado una variable experimental no comprobada, en condiciones controladas, es decir se agregó al suelo en diferentes proporciones el aditivo Terrazyme, obteniendo un 119% de aceptación del aditivo para mejorar la estabilidad del suelo.

Descriptiva porque se ha utilizado la estadística, curvas de labeo, hojas de cálculo para el procesamiento de la información, además del uso del Software SPSS versión 20.

#### **4.4. Población, muestra, unidad de análisis y unidad de observación.**

Universo: Los suelos de expansión de la ciudad de Cajamarca.

Muestra: Los suelos de expansión de la zona Sur este de la ciudad de Cajamarca.

Unidad de análisis: Los suelos de expansión de la zona sur este de la ciudad de Cajamarca que se llevaron a laboratorio.

Tabla 12. Muestra: Puntos críticos Progresivas

<b>Calicata</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Cota m.s.n.m</b>
<b>C-1</b>	<b>9205145</b>	<b>777052</b>	<b>2071</b>
<b>C-2</b>	<b>9204219</b>	<b>777332</b>	<b>2075</b>
<b>C-3</b>	<b>9203702</b>	<b>777940</b>	<b>2071</b>
<b>C-4</b>	<b>9203441</b>	<b>778122</b>	<b>2070</b>
<b>C-5</b>	<b>9202998</b>	<b>778317</b>	<b>2077</b>
<b>C-6</b>	<b>9202628</b>	<b>778615</b>	<b>2080</b>
<b>C-7</b>	<b>9202320</b>	<b>778315</b>	<b>2077</b>

#### **4.5. Técnicas e instrumentos de recopilación de información**

Para el procesamiento de información se consideró

- Revisión de material Bibliográfico
- Muestreo de suelos en las exploraciones

Se presentan las hojas de cálculo que se utilizaron en los diferentes tipos de Suelos en los ensayos de CBR, como son Granulometría, límites de Attemberg, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, contenido de humedad,

#### **4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de información**

La recolección de datos se realizó mediante los cuadros de doble entrada, gráficos formatos de ensayos de laboratorio como se adjunta en el apéndice.

Para el cálculo de la capacidad de soporte de terreno CBR se utilizó las fórmulas:

Terzaghi

Para las excavaciones geotécnicas se realizó un reconocimiento del terreno, se ubicaron las calicatas considerando puntos críticos de la carretera (deformaciones y asentamientos).

#### **4.7. Equipos, materiales, insumos, etc.**

##### **Materiales**

- Terrazyme
- 01 Libreta De Campo
- 01 Picota
- 01 Pico
- 01 Pala
- 01 Barreta
- Bolsas De Polietileno
- Sacos De Polietileno
- Etiquetas
- Espátula
- Estacas
- Clavos
- Yeso

## Equipo

- Juego De Taras
- Juego De Tamices
- Mortero
- Copa De Casa Grande
- Espátula
- Moldes Proctor
- Balanzas Electrónicas
- Estufa (110 °c)
- CBR
- Proctor modificado

#### 4.8. Matriz de consistencia metodológica

**Título: Efecto Del Aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona de expansión de la ciudad de Cajamarca.**

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables categorías	Dimensiones factores	Indicadores cualidades	Fuente o instrumento de recolección de datos	Metodología	Población y muestra
¿Cuál es el efecto del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de subrasantes en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz?	Determinar efecto del aditivo terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz.	La utilización del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante incrementa de 30% a más la capacidad de soporte del terreno sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca-Huacariz.	<b>Dependiente</b> Aditivo de terrazyme en la estabilización de suelos	Clasificación AASTHO	Grupos	Antecedentes de investigaciones anteriores, artículos científicos, pesquisas y otros	Inductivo, obtención de datos mediante ensayos de laboratorio	Huacariz.
	Determinar las características físicas, químicas y mecánicas de los suelos de fundación en la zona sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca – Huacariz.			Granulometría	%			
	Determinar la capacidad de soporte de terreno de la subrasante sin y con aditivo Terrazyme.			<b>Independiente</b> Capacidad de soporte de terreno	CBR			

## CAPITULO V

### RESULTADO Y DISCUSION

#### 5.1 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Después de haber realizado las exploraciones geotécnicas, se ha determinado las características físicas y mecánicas de los suelos de fundación a -1.50 m de profundidad:

*Tabla 13. Diseño Patrón CBR*

DISEÑO PATRON							
CALICATA/ PROFUNDIDAD	CBR 95%	CBR 100%	L.L. %	L.P %	I.P %	C. O. DE HUMED. (%)	CLASIFICACION AASTHO
C-1	3.54	5.60	38.76	20.87	17.89	20.72	A-6(13)
C-2	4.10	6.51	35.37	18.46	16.91	19.26	A-6(10)
C-3	4.30	6.70	43.18	25.92	17.26	18.33	A-7-6(7)
C-4	3.9	6.20	45.33	26.83	18.50	18.07	A-7-6(14)
C-5	3.70	5.90	36.54	19.88	16.66	18.53	A-6(9)
C-6	3.75	5.90	41.12	24.48	16.64	19.89	A-7-6(13)
C-7	3.60	5.70	37.77	22.52	15.25	21.37	A-6(10)

En el diseño patrón de las exploraciones geotécnicas en laboratorio se comprobó una variación al 95% de un CBR entre 3.54% a 4.30%, al 100% un CBR entre 5.60 % y 6.70%, un límite líquido que varía entre 35.37% a 45.33%, un límite plástico entre 18.46% a 26.83%, un índice de plasticidad entre 15.25% a 18.50%, un contenido óptimo de humedad entre 18.07% a 21.37% y una clasificación AASTHO entre un A-6 (10) a A-7-6 (14), respectivamente, que son arcillas de media a alta plasticidad.



Tabla 14. Aditivo Terrazyme 10 ML

CALICATA/ PROFUNDIDADES	CBR 95%	CBR 100%
C-1	3.70	5.90
C-2	4.01	6.30
C-3	3.50	6.10
C-4	3.50	5.60
C-5	3.45	5.90
C-6	4.00	6.30
C-7	3.90	6.20

En el diseño con Aditivo Terrazyme al 10 ml, se comprobó una variación al 95% de un CBR entre 3.45% y 4.01%, al 100% la variación se da entre 5.60% a 6.30%, siendo arcillas de mediana alta plasticidad.

Tabla 15 Aditivo Terrazyme 20 ML

CALICATA/ PROFUNDIDADES	CBR 95%	CBR 100%
C-1	3.80	6.10
C-2	4.10	6.51
C-3	3.70	6.40
C-4	3.50	5.90
C-5	3.60	6.20
C-6	3.80	6.60
C-7	4.10	6.50

En el diseño con Aditivo Terrazyme al 20 ml, se comprobó la variación al 95% de un CBR entre 3.70% a 4.10%, al 100% un CBR entre 6.10% a 6.60, siendo arcillas de mediana alta plasticidad.

Tabla 16. Aditivo Terrazyme 30 ML

CALICATA/ PROFUNDIDADES	CBR 95%	CBR 100%
C-1	3.90	6.30
C-2	4.30	6.70
C-3	3.90	6.60
C-4	3.50	6.10
C-5	3.80	6.60
C-6	3.90	6.80
C-7	3.90	6.80

En el diseño con Aditivo Terrazyme al 30 ml, se comprobó la variación al 95% de un CBR entre 3.90% a 4.30%, al 100% un CBR entre 6.10% a 6.80, siendo arcillas de mediana alta plasticidad.

Tabla 17: Aditivo Terrazyme 40 ML

CALICATA/ PROFUNDIDADES	CBR 95%	CBR 100%
C-1	3.70	5.90
C-2	3.90	6.20
C-3	3.60	6.20
C-4	3.44	5.90
C-5	3.50	6.10
C-6	3.70	6.50
C-7	3.60	6.20

En el diseño con Aditivo Terrazyme al 40 ml, se encontró la variación al 95% de un CBR entre 3.44% a 3.70%, al 100% un CBR entre 5.90% a 6.50%, siendo arcillas de mediana alta plasticidad

Tabla 18. Aditivo Terrazyme 60 ML

CALICATA/ PROFUNDIDADES	CBR 95%	CBR 100%
C-1	3.40	5.40
C-2	3.70	5.90
C-3	3.72	5.90
C-4	3.37	5.40
C-5	3.58	5.70
C-6	3.80	6.10
C-7	3.75	5.90

En el diseño con Aditivo Terrazyme al 60 ml, se encontró la variación al 95% de un CBR entre 3.37% a 3.80%, al 100% un CBR entre 5.40% a 6.10%, siendo arcillas de mediana alta plasticidad

Tabla 19. COMPARACION CBR PATRON CON EL PORCENTAJE DE TERRAZYME

COMPARACION CBR PATRON CON EL PORCENTAJE DE TERRAZYME											
CALICATA	CBR PATRON AL 100%	CBR 10 ML AL 100%	%	CBR 20 ML AL 100 %	%	CBR 30 ML AL 100 %	%	CBR 40 ML AL 100 %	%	CBR 60 ML AL 100 %	%
C-1	5.6	5.9	105	6.1	109	6.3	113	5.9	105	5.4	96.43
C-2	6.51	6.3	97	6.51	100	6.7	103	6.2	95	5.9	90.63
C-3	6.7	6.1	91	6.4	96	6.6	99	6.2	93	5.9	88.06
C-4	6.2	5.6	90	5.9	95	6.1	98	5.9	95	5.4	87.1
C-5	5.9	5.9	100	6.2	105	6.6	112	6.1	103	5.7	96.61
C-6	5.9	4	68	3.8	64	6.8	115	6.5	110	6.1	103.4
C-7	5.7	6.2	109	6.5	114	6.8	119	6.2	109	5.9	103.5

- De los resultados obtenidos en la Calicata 1 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, ha aumentado en su resistencia en un 113%
- De los resultados obtenidos en la Calicata 2 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, ha aumentado en su resistencia en un 103% ha aumentado en su resistencia en un 90%
- De los resultados obtenidos en la Calicata 3 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>,
- De los resultados obtenidos en la Calicata 4 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, ha aumentado en su resistencia en un 98%
- De los resultados obtenidos en la Calicata 5 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, ha aumentado en su resistencia en un 112%
- De los resultados obtenidos en la Calicata 6 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, ha aumentado en su resistencia en un 115%
- De los resultados obtenidos en la Calicata 7 y con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes se observa que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, ha aumentado en su resistencia en un 119%

## **5.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.**

### **5.2.1. INVESTIGACIONES DE CAMPO**

#### **TRABAJOS DE CAMPO.**

##### **CALICATAS.**

Mediante exploraciones geotécnicas ( calicatas) de suelos se realizó un total de siete calicatas manualmente, en pozo a cielo abierto, distribuida convenientemente en el área del estudio.

Las calicata se identificó con la nomenclatura C-1.. C-7

Con profundidad de 1.50m.

##### **MUESTRAS DISTURBADAS.**

Se tomaron muestras disturbadas de cada uno de los tipos de suelos encontrados, en cantidad suficiente como para realizar los ensayos de clasificación e identificación de suelos.

##### **MUESTREO INALTERADO.**

No se realizó.

##### **REGISTRO DE EXCAVACIONES.**

Paralelamente al muestreo, se realizó el registro de cada una de las calicatas, anotándose las principales características, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 19: Profundidad de las calicatas

N°	PROFUNDIDAD(m)
C – 1	- 1.50 m.
C – 2	- 1.50 m.
C – 3	- 1.50 m.
C -4	- 1.50 m.
C - 5	- 1.50 m.
C - 6	- 1.50 m.
C - 7	- 1.50 m.

### 5.2.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

Se realizaron los siguientes ensayos:

#### ENSAYOS ESTÁNDAR

- Análisis granulométrico : Norma ASTM-D422
- Límite Líquido : Norma ASTM-D423
- Límite Plástico : Norma ASTM-D424
- Humedad Natural : Norma ASTM-D2216
- Clasificación : Norma ASTM-D2487

Los resultados de todos los ensayos de laboratorio son mostrados en el Anexo I de Suelos.

#### CLASIFICACIÓN DE SUELOS.

Las muestras ensayadas en laboratorio se han clasificado de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS y AASTHO).

Tabla 20: Clasificación de suelos

CALICATA Nº	C – 1	C – 2	C – 3	C – 4	C – 5	C – 6	C – 7
Muestras	M – 1	M – 1	M – 1	M – 1	M – 1	M – 1	M – 1
Profundidad (m)	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.50
% pasa Tamiz Nº 3/8"	100	100	100	100	100	100	100
% pasa Tamiz Nº 4	98.8	99.7	99.7	99.2	99.6	99.5	99.3
% pasa Tamiz Nº 10	97.7	98.5	98.1	98.7	97.1	98.0	98.4
% pasa Tamiz Nº 40	93.6	92.2	89.4	90.4	88.3	92.3	93.6
% pasa Tamiz Nº 100	82.3	77.0	60.7	76.4	69.6	79.4	79.9
% pasa Tamiz Nº 200	75.4	70.6	54.9	73.6	66.4	76.8	73.8
Limite Líquido.	38.76	35.37	43.18	45.33	36.54	41.12	37.77
Limite Plástico.	20.87	18.46	25.92	26.83	19.88	24.48	22.52
Índice de Plasticidad	17.89	16.91	17.26	18.50	16.66	16.64	15.25
Clasificación SUCS.	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL
Clasificación AASTHO	A-6(13)	A-6(10)	A-7-6(7)	A-7-6(14)	A-6(9)	A-7-6(13)	A-6(10)
% de Humedad	20.72	19.26	18.33	18.07	18.53	19.89	21.37

### 5.2.1. EVALUACIÓN GEOTÉCNICA.

#### CALICATA Nº 1 y 2

Las calicatas 1,2,3,4,5,6 y 7 muestra 1 presentan arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas arcillas magras de color marrón claro amarillento de clasificación SUCS (CL) con un equivalente a la clasificación AASHTO A-6(13), A-6(10), A-7-6(7), A-7-6(14), A-6(9) con profundidad de 1.50, estos suelos son impermeables, con resistencia a la tubificación alta, resistencia al cortante media, susceptibilidad al agrietamiento de mediano a alta, susceptibilidad a la licuación de media a alta si mal compactados, manejabilidad de pobre a muy pobre. El nivel freático no se encontró.



## ENSAYOS CON EL ADITIVO TERRAZYME.

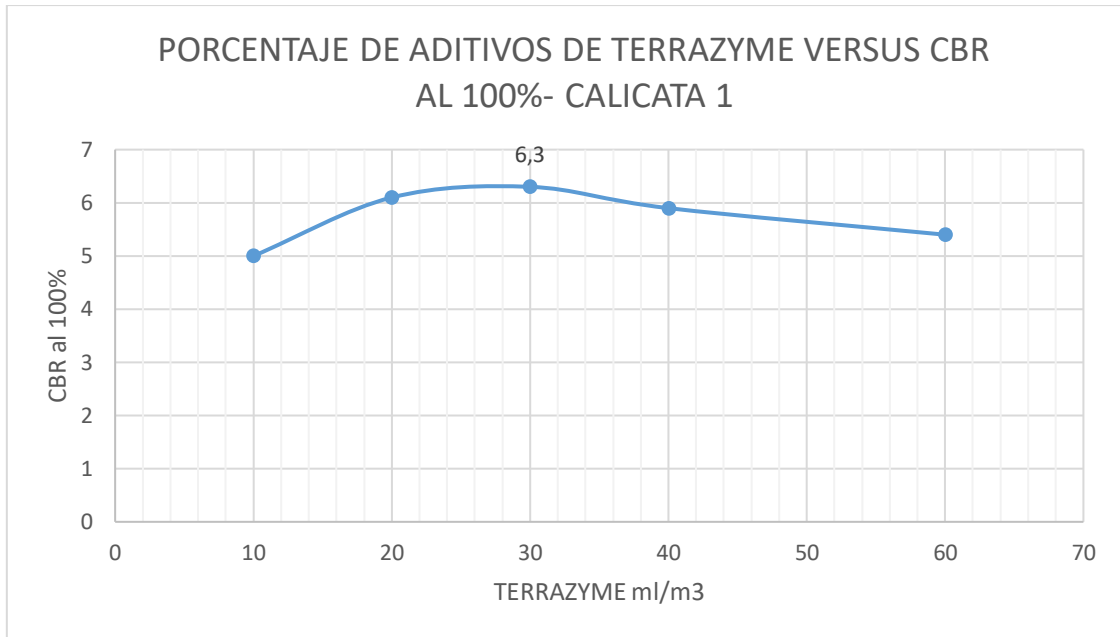


Figura 17. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 1

En la calicata 1 se agregó a la muestra de suelo 10 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.1%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.3%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.4%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.3 % y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30ml/m<sup>3</sup>.

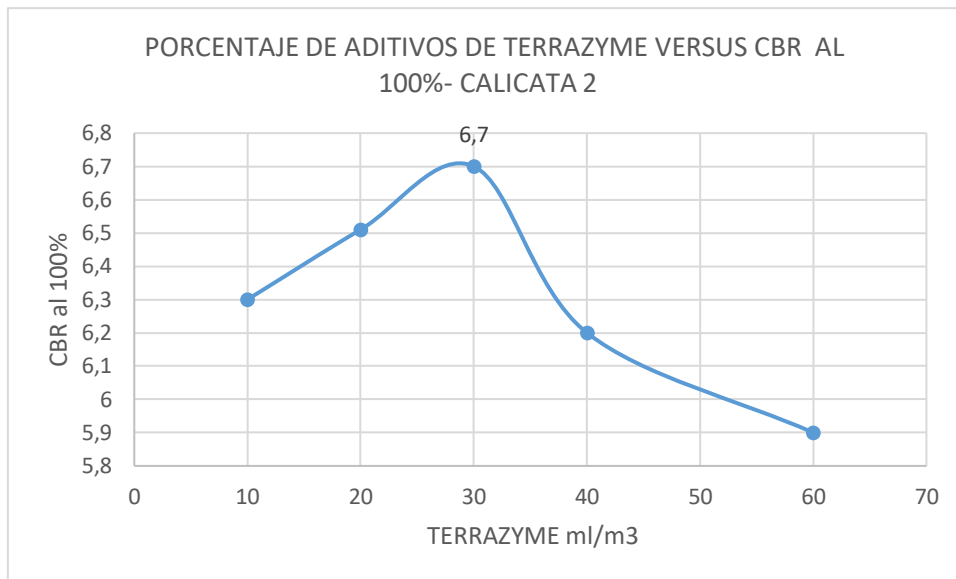


Figura 18. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 2

En la calicata 2 se agregó a la muestra de suelo 10 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.3%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.51%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.7%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 6.2%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.7 % y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30 ml/m<sup>3</sup>.

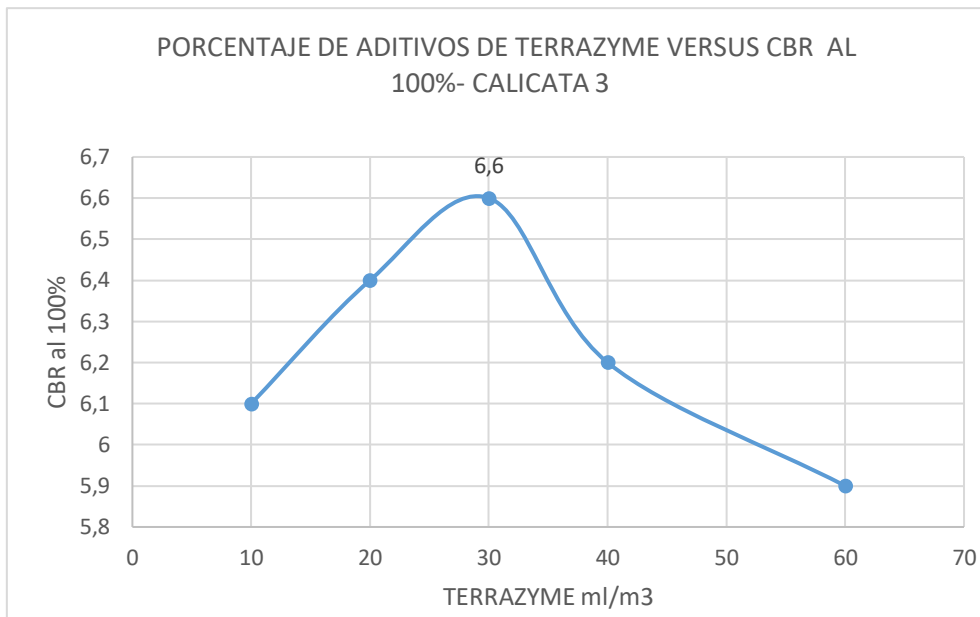


Figura 19. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 3

En la calicata 3 se agregó a la muestra de suelo 10 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.1%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.4%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.6%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 6.2%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.6 % y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30 ml/m<sup>3</sup>.

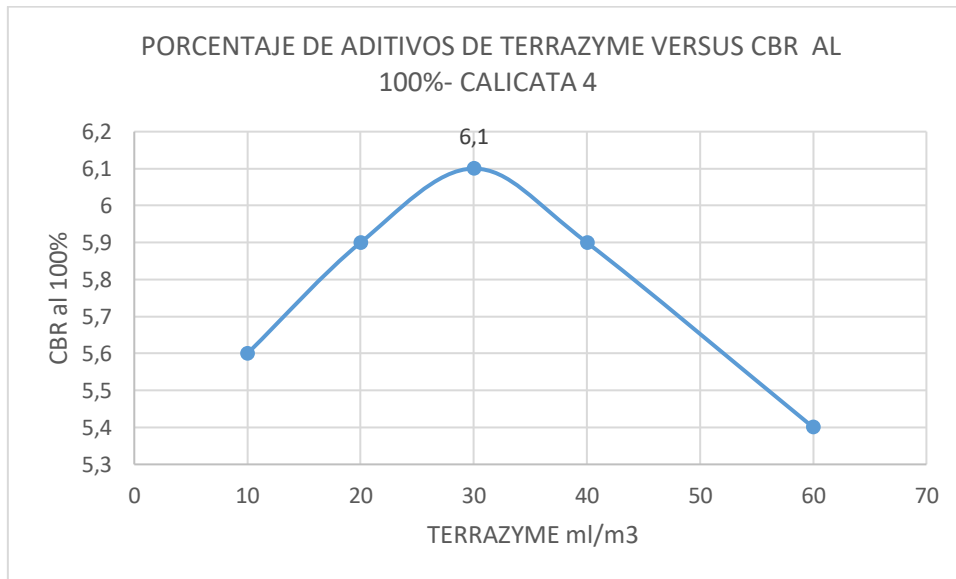


Figura 20. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 4

En la calicata 4 se agregó a la muestra de suelo 10 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 5.6%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.1%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.4%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.1 % y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30 ml/m<sup>3</sup> .

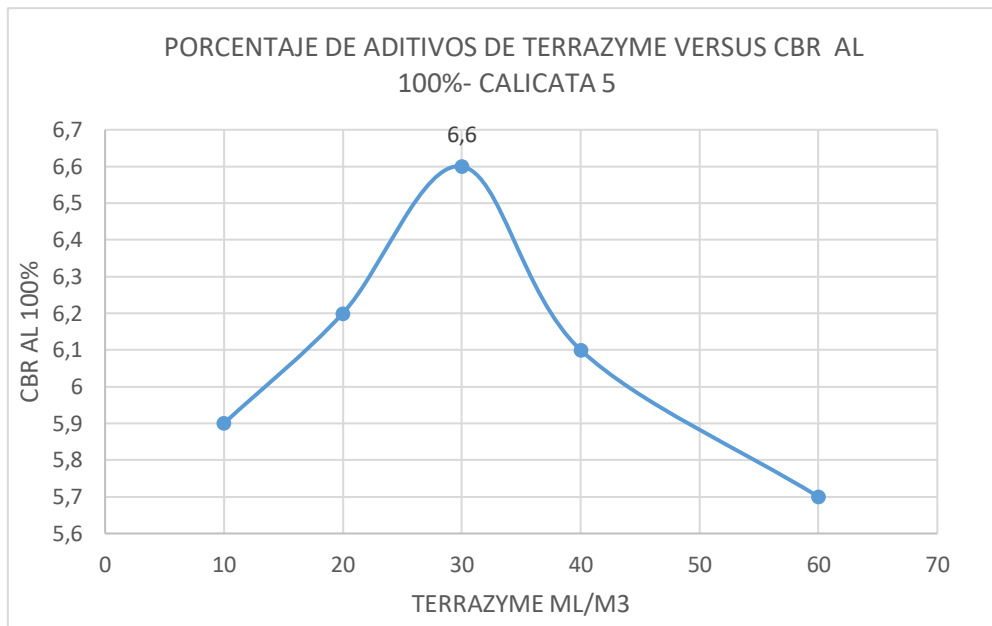


Figura 21. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 5

En la calicata 5 se agregó a la muestra de suelo 10 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.2%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.6%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 6.1%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.7%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.6 % y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30ml/m<sup>3</sup>.

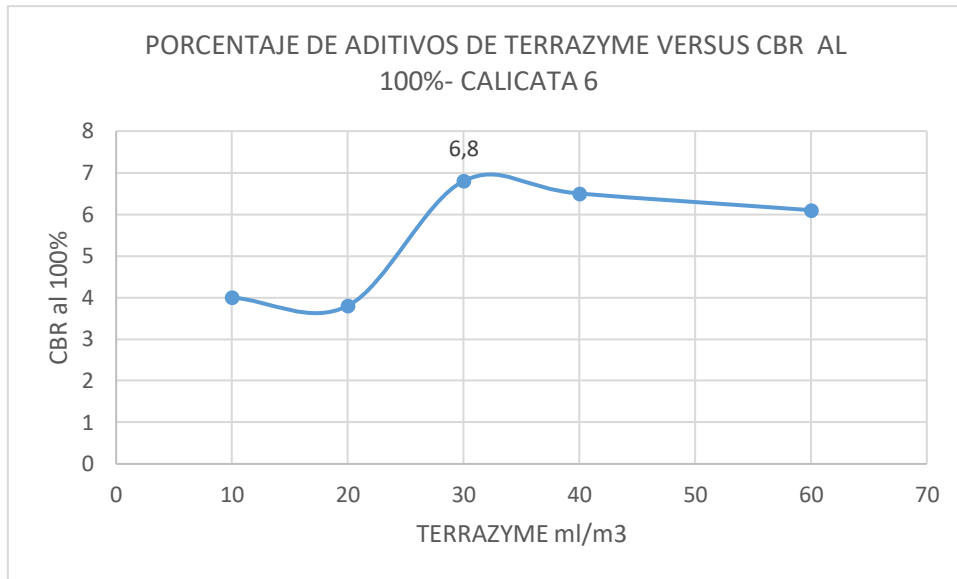


Figura 22. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 6

En la calicata 6 se agregó a la muestra de suelo 10 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 4.0%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 3.8%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.8%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 6.5%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 6.1%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.8% y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30 ml/m<sup>3</sup>.

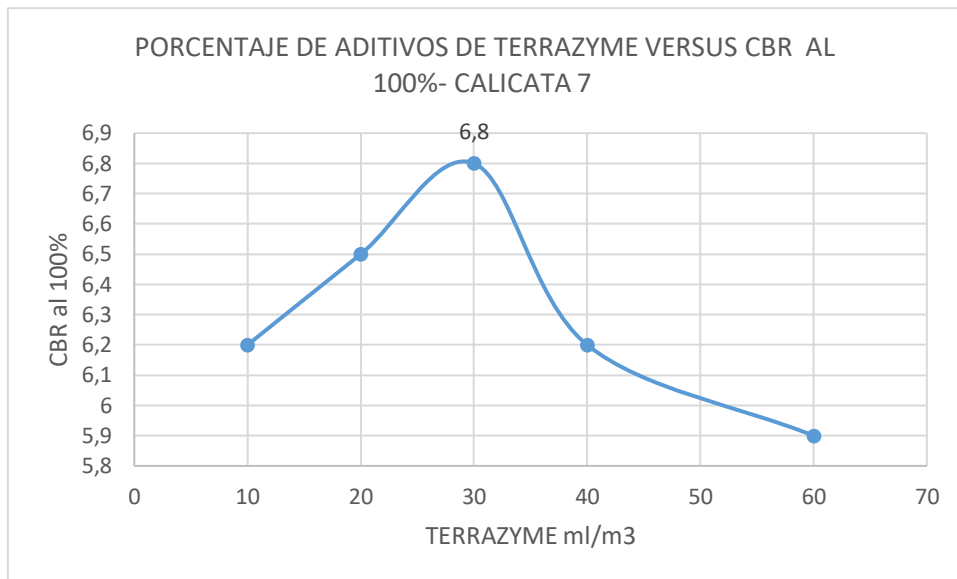


Figura 23. Porcentaje De Aditivo Terrazyme- Calicata 7

En la calicata 7 se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.2%, luego se agregó a la muestra de suelo 20 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.5%; se agregó a la muestra de suelo 30 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR aumentando la capacidad de soporte de terreno en un 6.8%; seguidamente se agregó a la muestra de suelo 40 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 6.2%; luego se agregó a la muestra de suelo 60 ml/m<sup>3</sup> del material al 100% de CBR disminuyendo la capacidad de soporte de terreno en un 5.9%

Se concluyendo que el contenido óptimo de CBR es 6.8 % y la cantidad de aditivo necesario para obtener el CBR es 30ml/m<sup>3</sup> .

### **5.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPOTESIS.**

La hipótesis planteada en nuestra investigación fue La utilización del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante incrementa de 30% a más la capacidad de soporte del terreno sur este de expansión de la ciudad de Cajamarca-Huacariz.

La contrastación de los resultados en campo y laboratorio y desarrollo de la investigación se comprobó en la utilización de 30 ml del aditivo Terrazyme en la estabilización de suelos arcillosos de la subrasante incrementa en un 19% la capacidad de soporte del terreno en la zona de expansión Huacariz al sur este de la ciudad de Cajamarca.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

El aditivo terrazyme tiene efecto en el aumento de la capacidad de soporte de la subrasante en un 19%, en los suelos estudiados en Cajamarca.

Dentro de las características físicas y mecánicas evidenciadas en las calicatas muestra 1 presentan arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, arcillas limosas arcillas magras de color marrón claro amarillento de clasificación SUCS (CL) con un equivalente a la clasificación AASHTO A-6(13), A-6(10), A-7-6(7), A-7-6(14), A-6(9) con profundidad de 1.50, estos suelos son impermeables, con resistencia a la tubificación alta, resistencia al cortante media, susceptibilidad al agrietamiento de mediano a alta, susceptibilidad a la licuación de media a alta si mal compactados, manejabilidad de pobre a muy pobre. Sin nivel freático encontrado.

En el diseño patrón se encontró la variación al 95% de un CBR entre 3.54% a 4.30%, al 100% un CBR entre 5.60 % y 6.70%, un límite líquido que varía entre 35.37% a 45.33%, un límite plástico entre 18.46% a 26.83%, un índice de plasticidad entre 15.25% a 18.50%, un contenido óptimo de humedad entre 18.07% a 21.37% y una clasificación AASTHO entre un A-6 (10) a A-7-6 (14), respectivamente, que son arcillas de mediana alta plasticidad.

Con la adición del aditivo Terrazyme en sus diferentes porcentajes en las calicatas se observó que el aumento de la capacidad de soporte de terreno en 30ml/m<sup>3</sup>, incrementó su resistencia, en la calicata 1: 13 %; calicata 5: 12%; calicata 6: 15%; calicata 7: 19%; calicata 7: 19%

## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar ensayos con el aditivo de Terrazyme en proporciones de 5-15-25-35-45-55 ml/m<sup>3</sup>; y con proporción de agua de 1:2 en laboratorio para determinar mejor aproximación a la curva de labeo en las muestras; así obtener el porcentaje de humedad óptima versus el porcentaje de aditivo.

La utilización del aditivo en la estabilización de suelos en la zona de expansión de la ciudad de Cajamarca debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones de usos. Un Litro.. de Terrazyme para 33.m<sup>3</sup> de material a compactar, en una dilución de 1:500 de agua,

A las autoridades de la Ciudad se recomienda que se considere en las próximas obras en la zona de Huacariz, al Aditivo Terrazyme en un porcentaje de 30ml/m<sup>3</sup>, para mejorar la estabilidad del suelo.

Se recomienda a las empresas constructoras, Municipalidades y/o otras entidades continuar con estudios similares usando otros tipos de aditivos como cloruro de sodio, cloruro magnesio, cloruro de potasio y otros.

Se recomienda que esta investigación sea presentada a las instituciones públicas y privadas para el mejoramiento de los tramos críticos de los pavimentos flexibles y rígidos de todas las ciudades.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bowels, J. (2002). Manual de laboratorios de suelos en ingeniería civil. Mexico: Limusa.
2. Braja, M. (2010). Ingeniería Geotécnica. California: J. Ross.
3. Camarena, J., Ordoñez, J., & Guichard, A. (2014). Caracterización del subsuelo y análisis de riesgo geotécnico asociado a las arcillas expansivas de la ciudad Tuxtla Gutiérrez. Ingeniería investigación y tecnología, 453-470.
4. Chang, L. (2007). California Bearing Ratio. Centro Peruano Japonés Congreso CISHID. Lima-Peru.
5. Chavez, J. (2014). Influencia de la Cal de Iso suelos de fundación de la carretera Cajamarca-Cumbe Mayo. Tesis no publicada. Cajamarca, Cajamarca, Peru: Universidad Nacional de Cajamarca.
6. Crespo, C. (2004). Vías de comunicación caminos , Ferrocarriles, aeropuertos , Puentes, Puertos. Mexico: Limusa.
7. Diaz , J., & Mejia, J. (2004). Estabilización de suelos mediante el uso de un aditivo Químico a base de compuesto inorgánico. Tesis de maestría. Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
8. Espinoza, G. (2012). Uso de la Estabilización Químico en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas de suelos de fundación limosa o arcillosa. Disertación de maestría no publicadas. Huanuco, Huanuco, Peru: Universidad Nacional Hermilio Valdizan.
9. Fratelli, M. (1993). Suelos de fundación y muros. Tesis no presentada. Caracas, Caracas, Venezuela.
10. Gutierrez, C. (2010). Estabilización Química de carreteras no pavimentadas en el Peru y ventajas corporativas del cloruro de magnesio (Biochifita) frente al cloruro de calcio. Tesis de maestría no publicada. Lima, Lima, Peru: Universidad Ricardo Palma.

11. Hernandez, J. (2008). Características físicas y propiedades Mecánica de suelos y sus metodos de medición. Tesis no publicadas. Guatemala, Guatemala, Guatemala.
12. Juarez, E., & Rico, A. (1997). Mecánica de Suelos. Mexico: Limusa.
13. Junco del Pino, J., & Tejada, E. (2011). Aditivo Químico obtenido de sales cuaternarias empleado para la estabilización de suelos arcillosos de subrasante de carreteras. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 4-22.
14. Kestler, A. (2009). Guia de estabilización con agregado seleccionado y propio en superficie de caminos de bajo volumen. Estados unidos.
15. López, J. (2003). Analisis estructural del edificios existente de Bioterio. Guatemala: Guatemala.
16. Marquez, S. (2005). Estabilización de suelos. Tesis No publicada. Patagonia, Patagonia, España.
17. Mayoral, P., Leyva, L., & Sanchez, R. (2011). Mecanica de suelos. Mexico: Limusa.
18. Ministerio de transporte y comunicaciones . Direccion general de caminos y ferrocarriles de. Lima Peru 2004.
19. Norma Técnica de Estabilizadores Químicos MTC E 1109 – 2004 (11), . (2011). Lima-Peru.
20. Pulgar Vidal, J. (1946). Historia y Geografia del Perú. Lima: UNMSM- Lima.
21. Rojas, F., & Camargo, A. (2004). Estabilización Física Química de suelos finos para subrazantes de vías Rurales. Estabilización Física Química de suelos finos para subrazantes de vías Rurales. Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
22. Rollins, K. (1998). Effect of Soil treatment with Terrazyme on CBR %. Natural Plus, 1-9.
23. Sanchez, C., Castro, J., Ureña, C., & Azañon, J. (2014). Stabilization of Clay and Marly soils using industrial waste, PH and LAsEr granulometry indicators, . titulo engineering Geology, 10-17.

24. Seco, R., Ramirez, F., Miqueleiz , L., Garcia, B., & Prieto, E. (2010). The use of non conventional in marls stabilization. *Revista Science Direct*, 419-423.
25. Solminhac, H., Echevarria, G., & Thenoux, G. (2013). *Estabilización química de suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos*. Santiago Chile: Santiago Chile.
26. Terrazyme. (2014). *Stasoil sac*, 10-14.
27. Tomas, R., Cano , M., Garcia, B., Santamarta, J., & Hernandez, L. (2012). *Herramienta de aprendizaje de Mecanica de suelos*. Alicante: Universidad de Alicante.
28. Velarde, D. (2015). *Fundamentos de la ingeniería Geotécnica Braja Das- Solucionario*. Lima: Peru.
29. Vivar, g. (1995). *Diseño de construcción de pavimentos* . Lima: Limusa.



FOTO 3: Colocación del aditivo Terrazyme a la muestra



FOTO 4: Realizando los ensayos en laboratorio con la colocación del aditivo Terrazyme a la muestra.



FOTO 5: Midiendo los porcentajes de aditivo con terrazyme para los ensayos en laboratorio.

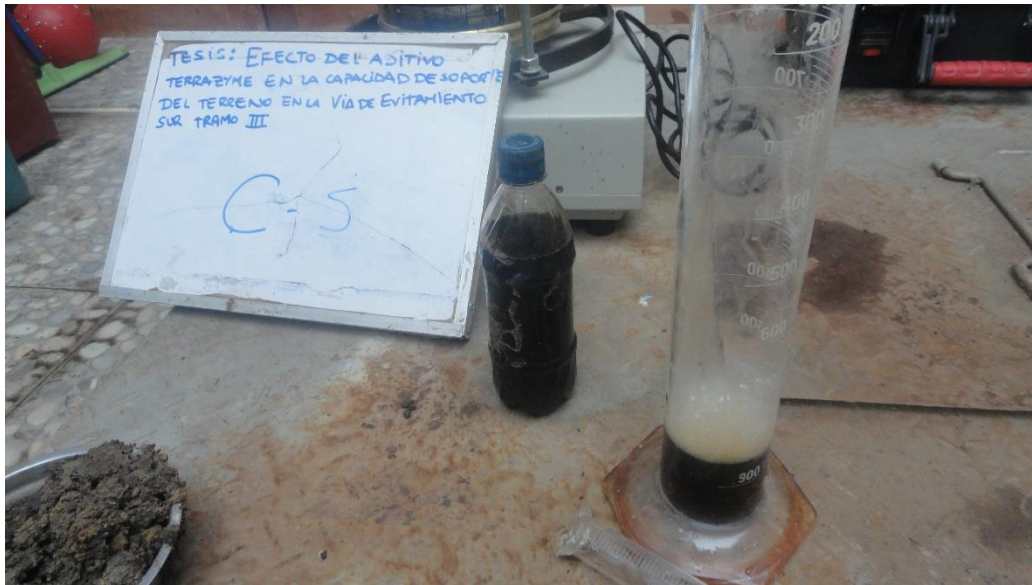


FOTO 6: Midiendo los ensayos en laboratorio capacidad de soporte de terreno muestra 6.





FOTO 7: Midiendo los ensayos en laboratorio capacidad de soporte de terreno muestra 3.



FOTO 8: Equipos de laboratorio.



**ANEXOS.**

**ANALISIS DE SUELOS**