



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

## FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



# UAC

## TESIS

---

**“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA”.**

---

### Presentado por:

Bach. Quispe Salas, Jhoel David

Bach. Herrera Huaranca, Paul

**Para optar al título profesional de  
Ingeniero Civil**

### Asesor:

Dr. Ing. Chacón Sánchez, Víctor

**CUSCO- PERÚ**

**2021**



## Dedicatoria

A Dios por guiarme siempre, darme fuerzas y haberme otorgado una familia maravillosa.

A mis padres David e Isabel, porque ellos son la motivación y pilar de mi vida, por todo su amor, esfuerzo, perseverancia, fomentar en mí el deseo de superación y sacrificio que me brindan siempre.

A mi hermana Sorayda, mi cuñado Reynaldo, y mi sobrino Alejandrito por todo el amor, dedicación, apoyo, ser mi guía y ejemplo a seguir.

A María Alejandra, por todo su amor, cariño y apoyo incondicional.

Bach. Jhoel David Quispe Salas

A Dios por darme el don de la vida.

A mis padres, Delfina y Julio, quienes han sido el soporte más importante de mi vida y han estado conmigo apoyándome en cada etapa de mi vida, en cada meta que me trazado.

A mis hermanas maravillosas por ayudarme a ser mejor persona por el apoyo incondicional.

A toda mi familia, un apoyo como el suyo es invaluable.

Bach. Paul Herrera Huaranca



## Agradecimientos

Queremos agradecer a Dios y a nuestras familias, por su invaluable sacrificio, inculcarnos valores y principios para conseguir todos nuestros objetivos, sin ellos, no hubiera sido posible realizar nuestra tesis.

Nuestro profundo agradecimiento y consideración al Ing. Víctor Chacón Sánchez, por habernos brindado su apoyo, ser nuestro mentor y guía en todo momento.

Nuestro agradecimiento al Ing. Eigner Román Villegas, por su disposición, apoyo y asesoramiento en el desarrollo de la tesis.

Nuestro cordial agradecimiento al Ing. Ronald Vera Gallegos, por todos sus consejos, apoyo y tiempo brindado en todo el desarrollo de la tesis.

Finalmente, nuestro agradecimiento a toda la plana docente de la escuela profesional de Ingeniería Civil por sus enseñanzas, y a todas las personas que hicieron posible culminar la presente investigación.

Bach. Jhoel David Quispe Salas

Bach. Paul Herrera Huarancca



## Resumen

Esta investigación tiene el objetivo de determinar la variación de un suelo estabilizado con tereftalato de polietileno respecto a uno estabilizado según la norma del MTC (cal) para la estabilización de la subrasante de la carretera Maras-Moray, provincia de Urubamba del departamento de Cusco, teniendo como finalidad hacer una evaluación comparativa al aplicar en una muestra tereftalato de polietileno y en la otra cal, en los suelos arcillosos de baja capacidad de soporte para obtener suelos mejorados a nivel de subrasante.

La técnica con la que se realizó la recolección de datos está enfocada primeramente en la observación directa in situ; demostrando de esta manera que los instrumentos utilizados son los más adecuados y sugeridos en el Manual de Suelos y Pavimentos del MTC, y otras con referencia a la estabilización de suelos, como materiales, equipos y herramientas manuales.

Se llevó a cabo en 2 tramos críticos y vulnerables de la carretera, donde se hicieron 4 calicatas, ambos tramos presentan un suelo arcilloso muy carente de grava, con baja capacidad de soporte y un CBR inferior al 6%, para lo cual se tienen dos opciones, mejorar o cambiar el suelo con material aceptable de cantera, para dicha investigación se eligió por la primera. Se optó por la mejora con Tereftalato de polietileno, para luego poder hacer la comparación respectiva con el estabilizador recomendado por el MTC (cal). Para poder determinar el tipo de estabilizador según el MTC (2014) “Manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos”. De los 8 tipos de estabilizadores que nos sugiere, solo uno es apto a las características del suelo a mejorar, asumiendo la estabilización suelo - cal.

Realizamos una investigación enfocada con el ensayo del CBR en el laboratorio de las instalaciones de la Universidad Andina del Cusco, para determinar la dosificación óptima del tereftalato de polietileno, en el cual se realizaron cuadros, que nos permitieron analizar los resultados del estudio.

Al utilizarse el tereftalato de polietileno como estabilizador, se concluye que pueden ser utilizados en subrasante para mejorar las propiedades físico mecánicas, con una cantidad de un porcentaje de 1.5% con respecto al peso del suelo y además la forma geométrica rectangular con dimensiones entre 5 y 10 mm. En términos de CBR para un suelo de baja capacidad de soporte con presencia de tereftalato de polietileno incrementa porcentualmente en un promedio de 26.5% y la cal hasta un 350%, la expansión en el tereftalato disminuye en 52.8% y la cal en 80%.

**Palabras Clave:** Tereftalato de polietileno, capacidad de soporte, estabilización, CBR, cal.



## Abstract

This research aims to determine the variation of a soil stabilized with polyethylene terephthalate compared to one stabilized according to the MTC (lime) standard for the stabilization of the subgrade of the Maras-Moray highway, Urubamba Province of the Department of Cusco, with the purpose of making a comparative evaluation when applying polyethylene terephthalate in one sample and in the other lime, in clay soils with low bearing capacity to obtain improved soils at the subgrade level.

The technique with which the data collection was carried out is primarily focused on direct observation in situ; demonstrating in this way that the instruments used are the most appropriate and suggested in the MTC soil and pavement manual, and others with reference to soil stabilization, such as equipment, materials and manual tools.

It was carried out in 2 critical and vulnerable sections of the road, where 4 pits were made, both sections present a clay soil very lacking in gravel, with low bearing capacity and a CBR of less than 6%, for which there are two options, improve or change the soil with acceptable quarry material, for this investigation was chosen by the first. It was decided to improve with polyethylene terephthalate, in order to then be able to make the respective comparison with the stabilizer recommended by the MTC (lime). In order to determine the type of stabilizer according to the MTC (2014) "Manual of highways: soils, geology, geotechnics and pavements". Of the 8 types of stabilizers that he suggests, only one is suitable for the characteristics of the soil to be improved, assuming soil - lime stabilization.

We carried out a focused investigation with the CBR test in the laboratory of the facilities of the Universidad Andina del Cusco, to determine the optimal dosage of polyethylene terephthalate, in which tables were made, which allowed us to analyze the results of the study.

By using polyethylene terephthalate as a stabilizer, it is concluded that they can be used as a subgrade to improve the physical-mechanical properties, with an amount of a percentage of 1.5% with respect to the weight of the soil and also the rectangular geometric shape with dimensions between 5 and 10 mm. In terms of CBR for a soil with low bearing capacity with the presence of polyethylene terephthalate, it increases percentage by an average of 26.5% and lime up to 350%, the expansion in terephthalate decreases by 52.8% and lime by 80%.

Key words: Polyethylene terephthalate, bearing capacity, stabilization, CBR, lime.



## Introducción

La presencia de vías de comunicación son una pieza fundamental para el desarrollo de una sociedad, genera calidad de vida, promueve relaciones e intercambios comerciales, el turismo, la industria y así mismo generan competitividad entre otras sociedades. Por lo tanto, se requiere que las vías de comunicación sean de calidad y que permanezcan durables en el tiempo dando eficiencia al transporte. La presente investigación se basa en hacer una evaluación comparativa de las propiedades mecánicas de un suelo estabilizado según la norma del MTC, con otro propuesto con tereftalato de polietileno, para el uso como aditivo del mejoramiento de suelos de baja capacidad de soporte, debido a la carencia de investigaciones con dicho material.

La organización de la investigación está basada según la propuesta por la Universidad Andina del Cusco, como se detalla a continuación:

- Capítulo 1- Planteamiento del problema: Se realiza la descripción del problema, la formulación interrogativa del problema, justificaciones, limitaciones y objetivos.
- Capítulo 2- Marco teórico: Se describen los antecedentes de la tesis, los aspectos teóricos pertinentes, la hipótesis y la definición de variables.
- Capítulo 3- Metodología: Se detalla la metodología de la investigación, diseño de la investigación, población y muestra, se mencionan los instrumentos y recolección de datos con su respectivo procesamiento.
- Capítulo 4- Resultados: Donde se muestran los principales resultados que se obtuvieron de la investigación, así mismo la interpretación correspondiente.
- Capítulo 5 – Discusión: En el cual se discute sobre los resultados, su implicancia y sobre las limitaciones que se presentaron durante la investigación.
- Glosario: Trata del glosario de términos utilizados en la investigación y las abreviaturas que se utilizaron en todo el trabajo de investigación.
- Conclusiones: Donde se mencionan las conclusiones a las que se llega con la investigación en función de las hipótesis planteadas.
- Recomendaciones: En el cual, se brindan recomendaciones en función de los resultados alcanzados en presente investigación.
- Referencias: El cual, contiene un listado de las referencias bibliográficas utilizadas en el desarrollo de toda la investigación.



- Anexos: Donde se encuentra la matriz de consistencia de la investigación, el registro fotográfico y la recolección de datos de todo el trabajo de investigación.

La idea surge a partir del excesivo y mal uso que se le da a las botellas de plástico, dentro de ellas se encuentra al tereftalato de polietileno, como por ejemplo: los refrescos, bebidas deportivas, agua y jugos, además no reciben un adecuado proceso de reciclaje, por ese motivo queremos darle un valor agregado para poder reducir el impacto ambiental en la construcción o mantenimiento de caminos.

Existen otros métodos con los que se puede mejorar un terreno, pero estos no están mencionados y descritos por el MTC o alguna normativa, dando lugar a los polímeros (tereftalato de polietileno). Seguidamente se realizan los objetivos con la finalidad de que se conozca nuestra meta, a partir de ahí se comienza con las hipótesis que con ayuda de los ensayos realizados en el laboratorio de las instalaciones de la Universidad Andina del Cusco se logrará demostrar algunas de ellas, de esta manera se podrá ver cuáles serán los resultados finales llegando así a diferentes conclusiones significativas para esta investigación.



## Índice general

Dedicatoria .....	I
Agradecimientos.....	II
Resumen .....	III
Abstract .....	IV
Introducción .....	V
Índice general .....	VI
Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas.....	VIII
<b>1. Capítulo I: Planteamiento del problema .....</b>	<b>1</b>
1.1. Identificación del problema .....	1
1.1.1. Descripción del problema .....	1
1.1.2. Formulación del problema .....	3
1.2. Justificación e importancia de la investigación .....	4
1.2.1. Justificación técnica.....	4
1.2.2. Justificación social.....	4
1.2.3. Justificación por viabilidad.....	4
1.2.4. Justificación por relevancia .....	4
1.3. Limitaciones de la investigación.....	4
1.3.1. Limitación territorial.....	5
1.3.2. Limitaciones de materiales .....	5
1.3.3. Limitaciones de ensayo.....	5
1.3.4. Limitación de normativa.....	5
1.3.5. Limitación de equipos.....	5
1.4. Objetivo de la investigación .....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos .....	6
<b>2. Capítulo II: Marco teórico .....</b>	<b>7</b>
2.1. Antecedentes de la tesis o investigación actual .....	7
2.1.1. Antecedentes a nivel nacional.....	7
2.1.2. Antecedentes a nivel internacional .....	10
2.2. Aspectos teóricos pertinentes.....	12
2.2.1. Subrasante.....	12
2.2.2. Subrasantes de suelos arcillosos .....	23



2.2.3. Estabilización de suelos .....	26
2.2.4. La cal.....	32
2.2.5. Polímeros reciclados .....	33
2.3. Hipótesis .....	36
2.3.1. Hipótesis general.....	36
2.3.2. Sub hipótesis .....	37
2.4. Definición de variables. ....	37
2.4.1. Variables independientes. ....	37
2.4.2. Variables dependientes. ....	37
2.4.3. Cuadro de Operacionalización de variables.....	38
<b>3. Capítulo III: Metodología .....</b>	<b>39</b>
3.1. Metodología de la investigación .....	39
3.1.1. Tipo de investigación.....	39
3.1.2. Nivel de la investigación.....	39
3.1.3. Método de investigación .....	39
3.2. Diseño de la investigación .....	39
3.2.1. Diseño metodológico .....	39
3.2.2. Diseño de ingeniería .....	39
3.3. Población y muestra.....	41
3.3.1. Población .....	41
3.3.2. Muestra .....	41
3.3.3. Criterios de inclusión .....	42
3.4. Instrumentos.....	42
3.4.1. Instrumentos metodológicos .....	42
3.4.2. Instrumentos de ingeniería.....	51
3.5. Procedimientos de recolección de datos. ....	57
3.5.1. Caracterización del material .....	57
3.5.2. Selección del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno. ....	92
3.5.3. Selección del porcentaje óptimo de la cal.....	103
3.6. Procedimiento de análisis de datos .....	119
3.6.1. Caracterización del material .....	119
3.6.2. Determinación de la dosificación y uso adecuado del tereftalato de polietileno.....	144
3.6.3. Determinación de la dosificación y uso adecuado de la cal .....	159
3.6.3.1. Determinación del porcentaje óptimo de cal mediante el uso de los límites de Atterberg para el suelo.....	159



3.6.3.2. Determinación del ensayo proctor suelo más Cal.....	160
<b>4. Capítulo IV: Resultados.....</b>	<b>164</b>
4.1. Contenido de humedad:.....	164
4.2. Análisis granulométrico por tamizado: .....	164
4.3. Determinación de la gravedad específica:.....	165
4.4. Determinación de limite líquido, límite plástico e IP: .....	166
4.5. Clasificación SUCS y AASHTO.....	166
4.6. Ensayo Proctor .....	166
4.7. Ensayo CBR: .....	167
4.7.1. Ensayo CBR del suelo natural.....	168
4.7.2. Determinación de la dosificación y uso adecuado del tereftalato de polietileno .....	172
4.7.3. Determinación de la dosificación y uso adecuado de la cal .....	182
4.7.4. Resumen de resultados obtenidos: .....	184
<b>5. Capítulo V: Discusión .....</b>	<b>187</b>
5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico .....	187
5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación .....	187
5.3. Comentarios de la demostración de la hipótesis .....	187
5.4. Aporte de la investigación.....	188
5.5. Incorporación de temas nuevos .....	188
Glosario .....	190
Conclusiones .....	193
Recomendaciones.....	194
Referencias .....	196
Anexos.....	199
Anexo 1- Matriz de consistencia.....	199
Anexo 2- Registro fotográfico.....	200
Anexo 3- Guías de observación .....	207



## Índice de figuras

Figura 1: Ubicación departamental y provincial del proyecto .....	2
Figura 2: (Google Earth- Maps) Imagen satelital de la ubicación del proyecto .....	3
Figura 3: Sección transversal- Pavimento flexible.....	14
Figura 4: Interpretación de la curva granulométrica .....	17
Figura 5: Equipo de la prueba de Proctor Estándar: (a) molde; (b) pisón.....	22
Figura 6: Triangulo de gradación .....	27
Figura 7: Guia referencial para la selección del tipo de estabilizador .....	30
Figura 8: Guia complementaria referencial para la selección de tipo de estabilizador.....	31
Figura 9: Frasco típico y símbolo de reciclaje (PET).....	34
Figura 10: Frasco típico y símbolo de reciclaje (HDPE) .....	35
Figura 11: Frasco típico y símbolo de reciclaje (V).....	35
Figura 12: Ensayo de análisis granulométrico (MTC E 107).....	43
Figura 13: Ensayo de contenido de humedad (MTC E 108).....	44
Figura 14: Ensayo de límite líquido (MTC E 110) .....	45
Figura 15: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111).....	46
Figura 16: Ensayo de gravedad específica (MTC E 113) .....	47
Figura 17: Ensayo de proctor modificado (MTC E 115) .....	48
Figura 18: Ensayo de CBR (MTC E 132).....	50
Figura 19: Calicata N° 01- km 03+580 “a”, Calicata N°02-km 04+310 “b)” .....	58
Figura 20: Calicata N°03-km 05+430 “c”, Calicata N°04-km 06+120 “d)” .....	59
Figura 21: Secado del material “a)”, Ensayo de contenido de humedad “b)” .....	60
Figura 22: a) Secado de las muestras, b) Obtención del peso lavado y secado al horno .....	63
Figura 23: c) Tamizado del material, d) Proporción de las muestras retenidas en el tamizado .....	63
Figura 24: a) Uso de la bomba de vacíos, b) Eliminación de burbujas manualmente .....	67
Figura 25: a) Superficie horizontal con la cuchara casa grande.....	69
b) Registro del número de golpes establecidos .....	70
Figura 26: a) Amasado del suelo.....	72
b) Mezclado continuo sobre la placa de vidrio .....	74
Figura 27: a) Preparado de los especímenes .....	76
b) Especímenes con contenido de agua al óptimo estimado .....	79



Figura 28: c) Compactado del material por capas.....	77
d) Registro de masa del espécimen .....	79
Figura 29: a) Compactado del espécimen del molde .....	83
b) Inmersión del molde en el tanque de agua.....	85
Figura 30: c) Lectura para medir el hinchamiento colocando el trípode .....	83
d) Medición del dial para medir la penetración del pistón.....	86
Figura 31: Formas geométricas del tereftalato de polietileno.....	93
Figura 32: Ensayo CBR pasante $\frac{3}{4}$ " y retenido $\frac{1}{2}$ " "a)" .....	93
Ensayo CBR pasante $\frac{3}{8}$ " y retenido $\frac{1}{4}$ " "b)" .....	96
Figura 33: Ensayo CBR pasante $\frac{1}{4}$ " y retenido N°04 "c)" .....	93
Ensayo CBR pasante N°04 y retenido N°08 "d)".....	97
Figura 34: Dosificación del tereftalato al 0.5% y 1% "a)" .....	96
Dosificación del tereftalato al 1.5% y 2% "b)".....	100
Figura 35: Límite líquido con el 2.5%, 3.5%,4,5% y 5.5% de cal"a)" .....	101
Límite plástico con el 2.5%, 3.5%,4,5% y 5.5% de cal"b)" .....	106
Figura 36: Ensayo de proctor modificado con 4.5% de cal "a)" .....	107
Proctor modificado con 5.5% y 6.5% de cal "b)" .....	112
Figura 37: a) Inmersión del cbr con cal al 5.5% .....	111
b) Lectura de medición de los especímenes .....	116
Figura 38: Curvas granulométricas- Tramo 1- Calicata N°1.....	120
Figura 39: Curvas granulométricas- Tramo 1- Calicata N°2.....	121
Figura 40: Curvas granulométricas- Tramo 2- Calicata N°3.....	122
Figura 41: Curvas granulométricas- Tramo 2- Calicata N°4.....	123
Figura 42: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°1.....	127
Figura 43: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°2.....	128
Figura 44: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°3.....	128
Figura 45: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°4.....	128
Figura 46: Clasificación de suelos según SUCS- Braja M. Das- Calicata N°1.....	131
Figura 47: Clasificación del material del suelo fino (Carta plasticidad).....	132
Figura 48: Tabla de clasificación de suelos- SUCs- Braja. M. Das- Calicata N°1 .....	132
Figura 49: Tabla de clasificación de suelos- AASHTO- Braja M. Das- Calicata N°1.....	133



Figura 50: Muestra la curva de la compactación de la calicata N°3 y el contenido de humedad óptimo para alcanzar su máxima densidad seca. ....	136
Figura 51: Muestra la curva de la compactación de la calicata N°1 y el contenido de humedad óptimo para alcanzar su máxima densidad seca. ....	136
Figura 52: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°1 .....	139
Figura 53: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°2 .....	139
Figura 54: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°3 .....	140
Figura 55: Grafica de penetración vs carga- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°1 .....	140
Figura 56: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°1 .....	142
Figura 57: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°2 .....	142
Figura 58: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°3 .....	143
Figura 59: Grafica de penetración vs carga- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°1 .....	143
Figura 60: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante ¾”- Retenido ½”- Ensayo N°1 .....	145
Figura 61: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante ½”- Retenido 3/8” Ensayo N°2 .....	146
Figura 62: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 3/8”- Retenido 1/4” Ensayo N°3 .....	146
Figura 63: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/4”- Retenido N°4 Ensayo N°4 .....	147
Figura 64: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante N°4- Retenido N°8 Ensayo N°5 .....	147
Figura 65: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- De otra forma geométrica- Ensayo N°6 .....	148
Figura 66: Grafica de penetración vs carga- Tramo 1- Pasante 3/8”- Retenido ¼”- Ensayo N°3	148
Figura 67: Relación del valor de CBR con las dimensiones del Tereftalato de polietileno.....	149
Figura 68: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1 .....	151
Figura 69: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2 .....	151



Figura 70: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3.....	152
Figura 71: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4.....	152
Figura 72: Grafica de penetración vs carga- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3	153
Figura 73: Relación del valor de CBR con el % adecuado de polímeros- tramo 1.....	154
Figura 74: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1.....	155
Figura 75: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2.....	156
Figura 76: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3.....	156
Figura 77: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4.....	157
Figura 78: Grafica de penetración vs carga- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3	157
Figura 79: Relación del valor de CBR con el % adecuado de tereftalato de polietileno- Tramo 2 .....	159
Figura 80: Relación Humedad densidad al 5.5% de cal.....	161
Figura 81: CBR vs Densidad seca- Tramo 2- Porcentaje óptimo de Cal al 5.5%.....	162
Figura 82: Grafica de penetración vs carga- Tramo 2- Porcentaje óptimo de Cal al 5.5%.....	163
Figura 83: Curva de compactación- Calicata N°1 .....	167
Figura 84: Curva de compactación- Calicata N°3 .....	167
Figura 85: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°1 .....	168
Figura 86: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°2 .....	169
Figura 87: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°3 .....	169
Figura 88: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°1 .....	170
Figura 89: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°2 .....	171
Figura 90: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°3 .....	171
Figura 91: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante ¾”- Retenido ½”- Ensayo N°1.....	172



Figura 92: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/2”- Retenido 3/8” Ensayo N°2.....	173
Figura 93: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 3/8”- Retenido 1/4” Ensayo N°3.....	173
Figura 94: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/4”- Retenido N°4 Ensayo N°4.....	174
Figura 95: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante N°4- Retenido N°8 Ensayo N°5.....	174
Figura 96: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- De otra forma geométrica- Ensayo N°6.....	175
Figura 97: Relación del valor de CBR con las dimensiones del Tereftalato de polietileno.....	176
Figura 98: Relación del valor de CBR con el % adecuado de polímeros- tramo 1.....	177
Figura 99: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1.....	177
Figura 100: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2.....	178
Figura 101: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3.....	178
Figura 102: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4.....	179
Figura 103: Relación del valor de CBR con el % adecuado de Tereftalato de polietileno-Tramo 2.....	180
Figura 104: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1.....	180
Figura 105: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2.....	181
Figura 106: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3.....	181
Figura 107: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4.....	182
Figura 108: Relación Humedad – densidad seca al 5.5% de cal.....	183



Figura 109: CBR vs Densidad seca- Tramo 2- Porcentaje óptimo de Cal al 5.5%.....	183
Figura 110: Tramo 1 VS CBR (95% DMS).....	184
Figura 111: Tramo 2 VS CBR (95% DMS).....	185
Figura 112: Tramos 1 y 2 VS CBR (95% DMS) .....	185
Figura 113: Tramos 1 y 2 VS CBR (95% DMS)- Expansión (%).....	186



## Índice de tablas

Tabla 1: Categorías de la subrasante .....	14
Tabla 2: Índice de plasticidad.....	18
Tabla 3: Equivalente de arena .....	19
Tabla 4: Índice de grupo y suelo de subrasante .....	20
Tabla 5: Clasificación de suelos AASHTO y ASTM .....	21
Tabla 6: Operacionalización de variables .....	38
Tabla 7: Diseño de ingeniería.....	40
Tabla 8: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de análisis granulométrico .....	51
Tabla 9: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico.....	51
Tabla 10: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite líquido.....	52
Tabla 11: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de gravedad específica.....	53
Tabla 12: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de proctor modificado.....	53
Tabla 13: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural .....	54
Tabla 14: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural con PET .....	55
Tabla 15: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico con Cal .....	56
Tabla 16: Determinación del contenido de humedad de la Calicata N° 01 .....	61
Tabla 17: Determinación del contenido de humedad de la Calicata N° 02.....	61
Tabla 18: Determinación del contenido de humedad de la Calicata N° 03 .....	61
Tabla 19: Datos del ensayo de granulometría- Calicata N° 01.....	64
Tabla 20: Datos del ensayo de granulometría- Calicata N° 02.....	64
Tabla 21: Datos del ensayo de granulometría- Calicata N° 04.....	65
Tabla 22: Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°01 .....	68
Tabla 23: Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°02 .....	68
Tabla 24: Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°03 .....	68
Tabla 25: Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°1 .....	71
Tabla 26: Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°2 .....	71
Tabla 27: Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°3 .....	72
Tabla 28: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de calicata N°01.....	75



Tabla 29: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de la calicata N°02.....	75
Tabla 30: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de la calicata N° 03.....	76
Tabla 31: Método de ensayo proctor modificado.....	77
Tabla 32: Ensayo de proctor modificado de la calicata N°01 .....	80
Tabla 33: Ensayo de proctor modificado de la calicata N°03 .....	80
Tabla 34: Penetraciones a considerar en el ensayo .....	84
Tabla 35: Presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón.....	85
Tabla 36: Características de los especímenes de ensayo- CBR estado natural- Calicata N°1 .....	86
Tabla 37: Resumen de los resultados en ensayo- CBR estado natural- Calicata N°1 .....	87
Tabla 38: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°1- Ensayo 1 .....	88
Tabla 39: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°1- Ensayo 2.....	88
Tabla 40: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°1- Ensayo 3.....	89
Tabla 41: Características de los especímenes de ensayo- CBR estado natural- Calicata N°3 .....	89
Tabla 42: Resumen de los resultados en ensayo- CBR estado natural- Calicata N°3 .....	89
Tabla 43: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°3- Ensayo 1 .....	91
Tabla 44: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°3- Ensayo 2.....	91
Tabla 45: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°3- Ensayo 3.....	92
Tabla 46: Características de los especímenes de ensayo- CBR con polímero pasante 3/8” y retenido 1/4” .....	97
Tabla 47: Resumen de los resultados en ensayo- CBR con polímero pasante 3/8” y retenido 1/4” .....	98
Tabla 48: Etapa de absorción- CBR con polímero pasante 3/8” y retenido 1/4”.....	98
Tabla 49: Etapa de expansión- CBR con polímero pasante 3/8” y retenido 1/4” .....	99
Tabla 50: Etapa de penetración- CBR con polímero pasante 3/8” y retenido 1/4”.....	99
Tabla 51: Resultados de CBR al 95% DMS con diferentes % de tereftalato de polietileno- Tramo 1 .....	101
Tabla 52: Etapa de penetración- CBR con polímero al 0.5%- Tramo 1 .....	101
Tabla 53: Etapa de penetración- CBR con polímero al 1%- Tramo 1 .....	102
Tabla 54: Etapa de penetración- CBR con polímero al 1.5%- Tramo 1 .....	102
Tabla 55: Etapa de penetración- CBR con polímero al 2%- Tramo 1 .....	103



Tabla 56: Guía referencial para la selección del tipo de Estabilizador del Manual de Carreteras .....	104
Tabla 57: Guía Complementaria Referencial para la selección del tipo de estabilizador- 2do cuadro de la norma .....	104
Tabla 58: Ensayo de límite líquido con cal al 2.5% .....	107
Tabla 59: Ensayo de límite líquido con cal al 3.5% .....	108
Tabla 60: Ensayo de límite líquido con cal al 4.5% .....	108
Tabla 61: Ensayo de límite líquido con cal al 5.5% .....	109
Tabla 62: Ensayo de límite plástico con cal al 2.5% .....	109
Tabla 63: Ensayo de límite plástico con cal al 3.5% .....	110
Tabla 64: Ensayo de límite plástico con cal al 4.5% .....	110
Tabla 65: Ensayo de límite plástico con cal al 5.5% .....	111
Tabla 66: Ensayo de proctor modificado con cal al 5.5% .....	113
Tabla 67: Características de los especímenes de ensayo- CBR con cal al 5.5% .....	117
Tabla 68: Resumen de los resultados de ensayo- CBR con cal al 5.5% .....	117
Tabla 69: Etapa de absorción - CBR con cal al 5.5% .....	118
Tabla 70: Etapa de absorción- CBR con cal al 5.5% .....	118
Tabla 71: Etapa de penetración- CBR con cal al 5.5% .....	118
Tabla 72: Procesamiento de datos del ensayo granulométrico- Tramo 1- CalicataN°1 .....	119
Tabla 73: Procesamiento de datos del ensayo granulométrico- Tramo 1- CalicataN°2 .....	120
Tabla 74: Procesamiento de datos del ensayo granulométrico- Tramo 2- CalicataN°3 .....	121
Tabla 75: Procesamiento de datos del ensayo granulometría – Tramo 2- Calicata N°4 .....	122
Tabla 76: Gravedad específica- Calicata N°1 .....	124
Tabla 77: Gravedad específica- Calicata N°3 .....	124
Tabla 78: Límite líquido- Calicata N°1 .....	125
Tabla 79: Límite líquido- Calicata N°2 .....	126
Tabla 80: Límite líquido- Calicata N°3 .....	126
Tabla 81: Límite líquido- Calicata N°4 .....	127
Tabla 82: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°1 .....	129
Tabla 83: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°2 .....	129
Tabla 84: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°3 .....	130



Tabla 85: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°4 .....	130
Tabla 86: Clasificación de suelos de todas las calicatas .....	134
Tabla 87: Cálculos para determinar la curva granulométrica de la muestra PM -3 .....	135
Tabla 88: Cálculos para determinar la curva granulométrica de la muestra PM -1 .....	135
Tabla 89: Resumen de la muestra PM-2 y contenido de humedad .....	136
Tabla 90 Muestra el resumen de los resultados de la muestra natural .....	137
Tabla 91: Resumen del ensayo CBR tramo 1, calicata N°1 .....	138
Tabla 92: Promedio de CBR tramo 1, calicata N°1 .....	138
Tabla 93: Promedio de la expansión y absorción- tramo 1, calicata N°1 .....	138
Tabla 94: Resumen del ensayo CBR tramo 2, calicata N°3 .....	141
Tabla 95: Promedio de CBR tramo 2, calicata N° 3 .....	141
Tabla 96: Promedio de % de exp. y abs. Tramo 2, calicata N° 3.....	141
Tabla 97: Resultados de CBR con polímeros al 1% .....	144
Tabla 98: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS .....	149
Tabla 99: Dimensiones adecuadas del tereftalato de polietileno .....	149
Tabla 100: Resultados de CBR al 95% DMS con diferentes % del tereftalato (PR)- Tramo 1 ...	150
Tabla 101: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- con variación de los porcentajes de tereftalato de polietileno- Tramo 1 .....	153
Tabla 102: Determinación del % adecuado- Tramo 1.....	154
Tabla 103: Resultados de CBR al 95% DMS con diferentes % de tereftalato de polietileno – Tramo 2.....	155
Tabla 104: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- Tramo 2 .....	158
Tabla 105: Determinación del % adecuado- Tramo 2.....	158
Tabla 106: Determinación del % adecuado de Cal .....	160
Tabla 107: Ensayos suelo más cal al 5.5%.....	160
Tabla 108: Resultados de proctor suelo- cal. ....	162
Tabla 109: CBR suelo- cal al 95% DMS .....	163
Tabla 110: Resumen del contenido de humedad.....	164
Tabla 111: Contenido del porcentaje por material .....	164
Tabla 112: Contenido del porcentaje por material .....	165
Tabla 113: Resultados de la gravedad específica.....	165



Tabla 114: Características plásticas del suelo.....	166
Tabla 115: Resultados de la Clasificación de suelos.....	166
Tabla 116: Resultados de Proctor suelo natural.....	166
Tabla 117: Promedio de CBR- Tramo 1- Calicata N°1.....	168
Tabla 118: Promedio de la expansión y absorción- tramo 1, calicata N°1.....	168
Tabla 119: Promedio de CBR tramo 2, calicata N° 3.....	170
Tabla 120: Promedio de % de exp. y abs. Tramo 2, calicata N° 3.....	170
Tabla 121: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- Determinación de la forma geométrica óptima del tereftalato de polietileno.....	172
Tabla 122: Dimensiones adecuadas del tereftalato de polietileno.....	175
Tabla 123: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- con variación de los porcentajes de tereftalato de polietileno- Tramo 1.....	176
Tabla 124: Determinación del % adecuado- Tramo 1.....	176
Tabla 125: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- Tramo 2.....	179
Tabla 126: Determinación del % adecuado- Tramo 2.....	179
Tabla 127: Ensayos suelo más cal al 5.5%.....	182
Tabla 128: CBR suelo- cal al 95% DMS.....	183
Tabla 129: CBR al 95% DMS- Expansión- Tramo 1 y 2.....	184
Tabla 130: Promedio del incremento del CBR- disminución de la Expansión- Tramo 1 y 2.....	184



## 1. Capítulo I: Planteamiento del problema

### 1.1. Identificación del problema

#### 1.1.1. Descripción del problema

El exceso de carreteras urbanísticas en mal estado en la región, es lo que nos lleva a indagar en dicha investigación, el deterioro y mal comportamiento de la estructura de la carretera en la región muestran el gran índice de accidentes a causa de estos (MTC 2008)

Para el desarrollo de toda población se viene construyendo carreteras de pavimentos y a nivel de afirmado, en muchas de estas obras se encuentran terrenos de fundación de baja capacidad de soporte, el cual necesita ser mejorado o cambiado por otro material que cumpla los parámetros exigidos por el MTC, actualmente para el mejoramiento de subrasante se adicionan cal, cemento, escoria, cloruro de sodio, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, productos asfálticos y también se puede estabilizar con geosintéticos, según el tipo de suelo y la importancia de la vía.

En algunas carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito, el suelo de fundación es limo-arcilloso y por lo general su capacidad de soporte es baja y la subrasante está categorizada como un So o S1 con un CBR menor al 6% y que requiere ser mejorada o cambiada. Es el caso de la carretera no pavimentada Maras- Moray que en ciertos tramos presenta subrasante limo arcilloso además que requieren ser mejoradas con cualquier método sugerido por el MTC, o por el método que se plantea en la presente investigación, que es el mejoramiento de la capacidad de soporte con la adición de polímeros reciclados (tereftalato de polietileno). Los polímeros reciclados se obtienen de un proceso de reciclaje de las botellas descartables PET (recipientes de agua y gaseosas) para luego ser cortados en formas rectangulares de diferentes dimensiones y con una dosificación adecuada se logra un incremento de la capacidad de soporte expresado en términos de CBR.

Actualmente, en la construcción de obras lineales es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras debido a consideraciones económicas, ambientales y técnicas, es por eso que antes de cambiar la subrasante de baja capacidad de soporte se recomienda realizar estudios y optar por el mejor método para poder mejorar y evitar movimientos de tierra.



Con el uso de los polímeros reciclados (tereftalato de polietileno) para el mejoramiento de algunas propiedades físicas- mecánicas del suelo de fundación, estaríamos solucionando algunos problemas como los que se plantearon, dándole un valor agregado a las botellas descartables tipo PET.

### 1.1.1.1. Ubicación geográfica

El presente trabajo de investigación se ubica en la Carretera Maras- Moray, perteneciente al tramo del Emp. CU-1166 de la Red Vial Nacional, tiene como inicio en la capital del distrito MARAS, y permite la interconexión entre dicha población y el Centro Arqueológico de MORAY en el distrito de Maras, provincia de Urubamba del departamento de Cusco.

Lugar donde se escogieron 2 tramos de la carretera no pavimentada Maras- Moray, distrito de Maras, provincia de Urubamba, el cual es una carretera afirmada con una longitud aproximada de 7.845km, y una vía clasificada como carretera de segundo orden, terreno accidentado (tipo 3).

Departamento	:Cusco
Provincia	:Urubamba
Distrito	:Maras
Coordenadas	: UTM- 18S WGS- 84
Inicio de la carretera	:ESTE-807691; NORTE-8524070
Fin de la carretera	:ESTE-803962; NORTE-8524605



Figura 1: Ubicación departamental, provincial y distrital del proyecto

Fuente: Centro Nacional de Planeamiento estratégico

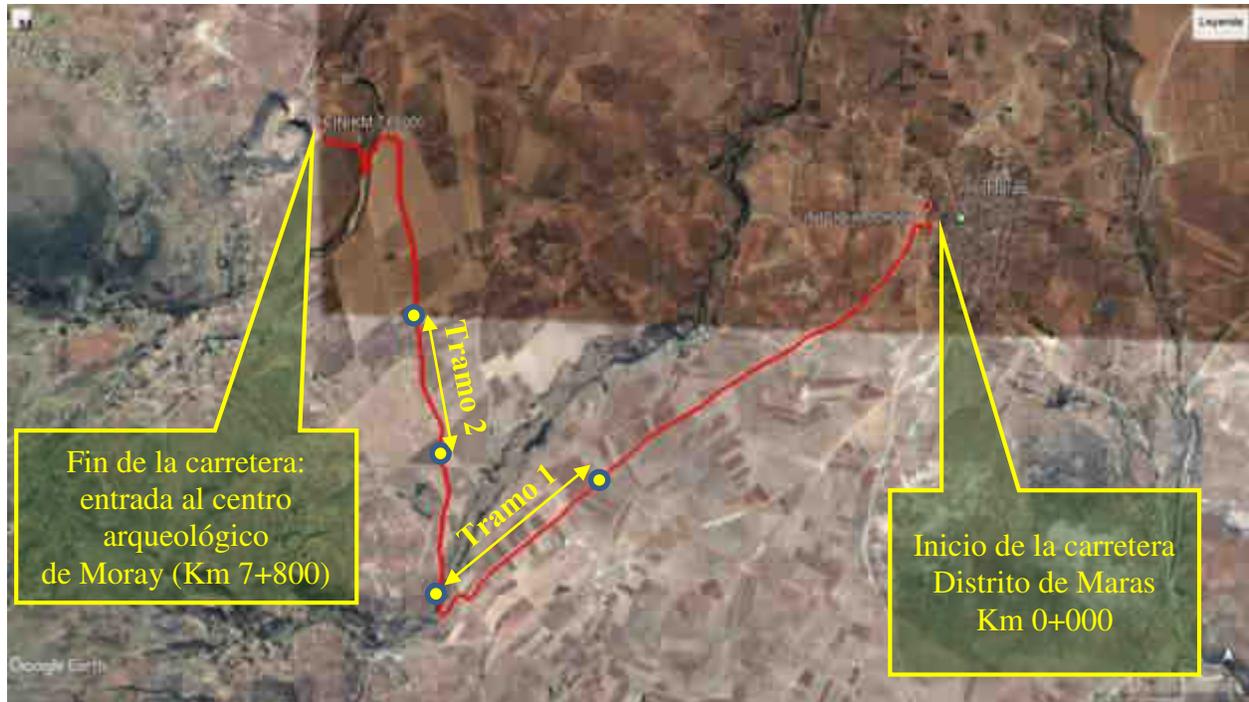


Figura 2: (Google Earth- Maps) Imagen satelital de la ubicación del proyecto

### 1.1.2. Formulación del problema

#### 1.1.2.1. Formulación del problema general:

¿En qué medida varía un suelo con tereftalato respecto a uno estabilizado de acuerdo a la norma del MTC para la estabilización de la subrasante de la carretera Maras- Moray?

#### 1.1.2.2. Formulación de los problemas específicos:

##### Problema específico 01:

¿Cómo varía el comportamiento de las propiedades de la subrasante al aplicar tereftalato respecto al estabilizante recomendado por el MTC cal en la carretera Maras- Moray?

##### Problema específico 02:

¿Cuál es la dosificación adecuada con el tereftalato de polietileno que incrementan el CBR de la carretera?

##### Problema específico 03:

¿Cómo varía el CBR en el suelo estabilizado con tereftalato respecto al estabilizado según la norma del MTC?



## **1.2. Justificación e importancia de la investigación**

### **1.2.1. Justificación técnica**

Darle un valor agregado al polímero reciclado (tereftalato de polietileno) o a un estabilizador según la normativa como la cal, son excelentes agentes para estabilizar la subrasante de la carretera mencionada de baja capacidad de soporte, de esa manera mejora considerablemente sus propiedades, colocándolo muy por encima de otros estabilizadores.

### **1.2.2. Justificación social**

Debido al costo económico y las diferentes aplicaciones que se le puede dar a las botellas descartables PET (tereftalato de polietileno), se puede aplicar mediante el "reciclaje", de tal forma que disminuya su efecto contaminante visual y que por el contrario se le pueda dar una utilidad que beneficie a la geotecnia vial, evitando así grandes movimientos de tierra.

### **1.2.3. Justificación por viabilidad**

Actualmente, en la construcción de obras lineales es fundamental minimizar y compensar al máximo posible el movimiento de tierras debido a consideraciones económicas, ambientales y técnicas, es por eso que antes de cambiar la subrasante de baja capacidad de soporte se recomienda realizar estudios y optar por el mejor método para poder mejorar y evitar movimientos de tierra.

### **1.2.4. Justificación por relevancia**

Así también la presente investigación busca dar la iniciativa a futuras investigaciones tanto a estudiantes de pregrado y posgrado para futuras investigaciones que puedan estar relacionadas con el tereftalato de polietileno, nacionales como internacionales.

## **1.3. Limitaciones de la investigación**

La presente investigación se llevará a cabo en 2 tramos críticos y vulnerables de la carretera no pavimentada Maras- Moray, una carretera a nivel de afirmado que une el centro poblado de Maras con el centro arqueológico de Moray, en el distrito de Maras, provincia de Urubamba, departamento del Cusco, con las coordenadas de inicio: ESTE-807691; NORTE-8524070 y final: ESTE-803962; NORTE-8524605.



### **1.3.1. Limitación territorial**

La presente, se limita territorialmente a los suelos de la carretera Maras- Moray, que une el centro poblado de Maras con el Centro Arqueológico de Moray, en el distrito de Maras, provincia de Urubamba, departamento del Cusco.

### **1.3.2. Limitaciones de materiales**

Los materiales usados en la presente investigación se limitan a la incorporación de 2 materiales, el tereftalato de polietileno y la cal, cuyos porcentajes son los siguientes: con referente al tereftalato de polietileno según nuestra zona de estudio varía entre 0.5% y 2%, así mismo la cal entre 2% y 6% con respecto al peso del suelo.

### **1.3.3. Limitaciones de ensayo**

Los ensayos de laboratorio para la presente tesis se limitan a la realización del contenido de humedad, gravedad específica de suelos, análisis granulométrico, límites de consistencia, próctor modificado - método B y CBR, ya que son ensayos indispensables para el estudio de sub rasante. En la actualidad estos ensayos son accesibles en el laboratorio de materiales de la Universidad Andina del Cusco.

### **1.3.4. Limitación de normativa**

La presente investigación se limita, con respecto al tipo de estabilizador según el MTC 2013 “Manual de carreteras, suelos, geología geotécnica y pavimentos”.

Con respecto a los ensayos realizados según el Manual de ensayo de materiales de la Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

### **1.3.5. Limitación de equipos**

La presente investigación se limita, con respecto al ensayo de gravedad específica a la bomba de vacíos, con respecto al ensayo proctor modificado al extractor de muestras, con respecto al ensayo CBR a la prensa, trípode y deformímetro.



## **1.4. Objetivo de la investigación**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar la variación de un suelo con tereftalato de polietileno respecto a uno estabilizado de acuerdo a la norma del MTC (cal) para la estabilización de la subrasante de la carretera Maras-Moray.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

#### **Objetivo específico 01:**

Determinar el comportamiento de las propiedades de la subrasante al aplicar tereftalato de polietileno respecto estabilizante recomendado por el MTC (cal) en la carretera Maras-Moray.

#### **Objetivo específico 02:**

Determinar la dosificación adecuada con el tereftalato de polietileno que incrementan el CBR de la carretera.

#### **Objetivo específico 03:**

Analizar la variación del CBR en un suelo estabilizado con tereftalato respecto al estabilizado según la norma del MTC.



## 2. Capítulo II: Marco teórico

### 2.1. Antecedentes de la tesis o investigación actual

#### 2.1.1. Antecedentes a nivel nacional

a) Investigación: **“Estabilización con polímero acrílico de la subrasante de la zona del puente de Añashuayco para su uso como base y comparación frente a un pavimento convencional”**

Autores: Solanchs Estéfany Calle Llactahuamaní

Moisés Gonzalo Arce Huahuachampi

**Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa**

Lugar: Arequipa – Perú.

Año: 2018.

#### **Resumen:**

La investigación aquí realizada tiene como objetivo principal demostrar el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo para poder ser utilizado como una capa estructural de base, mediante el uso de polímero acrílico a diferentes cantidades en base al contenido de humedad óptimo del material.

La estabilización se llevó a cabo con el uso de un polímero acrílico, para lo cual se realizaron 23 ensayos de laboratorio de CBR, 10 de Proctor modificado, y 5 de resistencia a la compresión), a diferentes contenidos de polímero, con el fin de hallar un contenido óptimo de polímero a utilizar. Se realiza una descripción del polímero acrílico, exponiendo sus propiedades químicas, propiedades físicas, composición, etc. que serán de utilidad para su utilización en suelos.

Dicho mejoramiento se ve reflejado en un aumento de 110% del valor de la capacidad de soporte (CBR), aumento de la densidad máxima seca en 1.70 g/cm<sup>3</sup> y aumento del esfuerzo de compresión del suelo natural en 20.65 kg/cm<sup>2</sup>.

#### **Aporte:**

El principal aporte a la investigación es el de poder conocer el comportamiento de suelos arcillosos, la dosificación e implementación de los polímeros acrílicos, de esa manera conocer los valores de



CBR para el mejoramiento de la subrasante, así mismo el esfuerzo de compresión del suelo natural y estabilizado con el contenido óptimo de polímero, así como la densidad máxima que puede tener un suelo estabilizado y sin estabilizar, por otro lado nos apoya en poder realizar el cálculo manual para que nuestros resultados sean fiables y aplicar en las intersecciones de estudio.

b) Investigación: **“Estabilización de la subrasante de suelo arcilloso con uso de polímero sintético en la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas, 2018”**.

Autor: Betty Karen Cuipal Chávez

**Universidad Cesar Vallejo**

Lugar: Lima – Perú.

Año: 2018.

**Resumen:**

La investigación tiene como objetivo analizar el efecto que causa la adición de polímero sintético en la estabilización de la subrasante de suelo arcilloso, carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas. Los polímeros sintéticos son de mayor producción y los que generan mayor impacto de contaminación puesto que son materiales no degradables, entre ellos tenemos las botellas de polietileno tereftalato (PET), para la cual se trata de reutilizar este material en la estabilización de subrasante de suelo arcilloso.

Se tomó como muestra de estudio el tramo km 4 +500 hasta el km 4 + 900 de la carretera Chachapoyas – Huancas, Amazonas. Se realizaron tres calicatas, extrayendo muestras de suelo para ser llevadas al laboratorio; los ensayos se realizaron en el laboratorio de mecánica de suelos, concreto y asfalto de la institución Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones Amazonas (DRTC – Amazonas).

La subrasante analizada se dividió en dos tramos según las características físicas y mecánicas, el primer tramo presenta suelos finos con alto contenido de arcilla de plasticidad media a elevada, el segundo tramo presenta contenido de limo arcillas de ligera plasticidad y escaso contenido de grava, en los dos tramos se determinó su capacidad de soporte de un CBR al 95% de su densidad máxima seca inferior al 6%, por lo que de acuerdo con MTC, se recomienda mejorar o cambiar el suelo de la subrasante.



La evaluación de resultados indica que realizando 27 ensayos de CBR en porcentajes 3%, 6% y 9% de adición polímero sintético, puede lograrse sustantivos incrementos en la capacidad de resistencia de los suelos con la adición de polímero sintético al 3%. El incremento en los valores de CBR varía entre 0.3% hasta 0.6%, en función de la naturaleza de los suelos y en porcentajes de adición de aditivos.

**Aporte:**

El principal aporte a la investigación es conocer la aplicación de un polímero sintético en la subrasante de suelos arcillosos, conocer su comportamiento, conocer la variación que existe entre los diferentes ensayos realizados como el CBR, los límites de Atterberg, la dosificación adecuado de acuerdo al tipo de suelo, así mismo conocer los cambios volumétricos por cambios de humedad, la expansión que realiza un suelo arcilloso, y conocer con mayor profundidad el comportamiento del polímero sintético en carreteras.

c) Investigación: **“Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la Urbanización San Luis de la ciudad de Abancay”.**

Autores: Lopez Sumarriva, José Johel  
Ortiz Pinares, Grely

**Universidad Tecnológica de los Andes**

Lugar: Abancay- Apurímac – Perú.

Año: 2018.

**Resumen:**

El objetivo de esta investigación es darle un valor agregado al polímero reciclado obtenido de las botellas descartables PET (tereftalato de polietileno), para el uso como aditivo para el mejoramiento de suelos de baja capacidad de soporte.

El procedimiento aplicado para determinar el porcentaje de cal óptimo, consistió en definir las propiedades físicas del suelo como la resistencia al esfuerzo cortante, contenido humedad, compactación y la plasticidad que adquirió el suelo al ser mezclado con cal, agregando porcentajes de cal de 0 a 8%, en intervalos de 2% a las muestras de suelo, para luego determinar su resistencia al corte (CBR).



Las muestras analizadas fueron obtenidas de los jirones de Molinopata y Santo Domingo de la Urbanización San Luis Baja de la ciudad de Abancay. Los mismos que se muestran indicados en los planos de ubicación de calicatas.

La evaluación de resultados indica que el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo en la primera muestra indicó que el suelo requiere de 3% de cal, para la segunda muestra se requiere 5% de cal en peso para lograr su objetivo. Se elaboraron especímenes de 0%, 2%, 4%, 6% y 8% de cal en peso del suelo seco, que se compactaron y saturaron para luego determinar los valores del esfuerzo cortante (CBR) para cada una de las muestras. Obteniéndose como resultado para la primera muestra que al añadirle un 8% de cal se obtuvo un valor de CBR del 145.00%, para la segunda muestra agregándole 8% de cal se obtuvo un valor de CBR de 69% muy por encima de lo exigido en los manuales del MTC.

#### **Aporte:**

El principal aporte de la investigación, fue el de conocer las técnicas y ventajas de la estabilización de las subrasantes arcillosas con cal, para ser utilizado como base o subbase para los pavimentos de las calles mencionadas, con ayuda de las normativas establecidas, así mismo comparar el suelo-cal con el suelo en estado natural, observando la variación en la plasticidad y expansión.

#### **2.1.2. Antecedentes a nivel internacional**

a) Investigación: **“Evaluación de la resistencia de un suelo areno arcilloso con refuerzos de fibras PET”**.

Autores: Carvajal Yate, Alejandra Marcela.

Garzón Novoa, Rafael Esteban.

**Universidad Piloto - Colombia**

Lugar: Girardot, Cundinamarca.

Año: 2019.

#### **Resumen:**

En el siguiente proyecto tiene como objetivo evaluar la resistencia de un suelo areno arcilloso al adicionar fibras PET como refuerzo, determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo



previo al mejoramiento y comparar los parámetros del suelo natural y con adición del 1.0% de fibras PET, observando los resultados obtenidos a partir de los ensayos.

La muestra estudiada de suelo areno arcilloso, se extrajo del Municipio de Agua de Dios, vereda san José de Agua de Dios es un municipio colombiano de Cundinamarca, ubicado en la provincia del Alto Magdalena, a 114 km al suroccidente de Bogotá. Limita por el oeste y por el norte con Tocaima; por el sur con Ricaurte y Nilo y por el Este con Nilo.

Se demostrará el proceso para mejorar un suelo de características areno arcilloso de baja plasticidad, haciendo uso de un método experimental que consiste en inclusiones de fibras PET para mejorar el comportamiento físico y mecánico del suelo que se va a estudiar.

El modo de uso de este material reciclado será en forma de fibras, se cortará en forma de tiras de 3 cm de longitud, 2 mm de ancho.

Los resultados que fueron obtenidos mediante esta investigación demostró como las fibras PET mejoran en 15% las propiedades de un suelo areno arcilloso de baja plasticidad dándole una resistencia alta.

#### **Aporte:**

El principal aporte de la investigación, fue conocer un método que consiste en la inclusión de fibras PET, para mejorar el comportamiento físico y mecánico, por esa razón se hizo hincapié en la estabilización de suelos con materiales reciclables, que presentaran un mejor desempeño en los procesos constructivos, y menos agresivos con el medio ambiente. Sin embargo, existen parámetros que están en función del tipo de suelo y en muchas ocasiones se tiene que efectuar métodos de mejoramiento químico y físico para el refuerzo de suelos.

b) Investigación: **“Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)”**

Autor: López Ortiz, José Alberto

#### **Universidad EIA de Antioquia**

Lugar: Envigado

Año: 2013.

#### **Resumen:**

La investigación tiene el objetivo de analizar el cambio a la resistencia al corte de un suelo arcilloso cuando se adicionan fibras de materiales de plástico reciclado, caracterizar física y mecánicamente



un suelo arcilloso mediante ensayos de laboratorio y las fibras plásticas empleadas para el refuerzo de éste.

La muestra fue tomada en el km 5 + 850 en el sector de el Tablón en la variante de Caldas, se observa un talud con una pendiente pronunciada el cual podría necesitar ser reforzado para su estabilidad. Además, es recolectada en costales para ser llevada al laboratorio de suelos de la EIA y proceder con los respectivos ensayos de laboratorio.

Los parámetros de resistencia al corte que definen las características mecánicas del suelo son el ángulo de fricción y la cohesión. En la ejecución de una obra civil, estos parámetros generalmente no se ajustan a los requerimientos del proyecto, por tal razón se debe buscar una solución para la estabilidad del suelo implicado en cualquier construcción.

Las búsquedas del mejoramiento de las condiciones ambientales han llevado a la utilización de los residuos del plástico para reforzar el suelo y mejorar sus propiedades mecánicas y físicas.

Este proyecto de grado busca el perfeccionamiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos, agregando fibras de 3,0 y 5,0 cm de longitud de PET (polietileno tereftalato) reciclado. Se prepararon 48 probetas de suelo con 4 porcentajes diferentes de fibra de PET (0,2%, 0,5%, 1,0% y 1,5% del peso del suelo). Mediante ensayos de compresión simple se encontró el cambio generado en el suelo debido a las fibras.

Los resultados obtenidos mediante esta investigación demostraron una mejora en los parámetros evaluados en los ensayos, se debe tener en cuenta que porcentaje de fibra puede agregarse y que longitudes son aptas para moldear apropiadamente las probetas.

### **Aporte:**

El principal aporte de la investigación, fue el mejoramiento de las condiciones ambientales en la utilización de los residuos del plástico, para reforzar el suelo y mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, así mismo la reutilización de los desechos poliméricos para reducir el impacto ambiental que estos generan.

## **2.2. Aspectos teóricos pertinentes**

### **2.2.1. Subrasante**

“La subrasante es la capa superficial de terreno natural, preparado y compactado, es el soporte de la estructura de una capa de afirmado o pavimento. La función de la subrasante es dar un apoyo razonablemente uniforme, sin cambios bruscos en el valor soporte, es decir, mucho más importante



es que la subrasante brinde un apoyo estable a que tenga una alta capacidad de soporte. Por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con la expansión de suelos” AASHTO, (1993).

La subrasante es la capa superior del terraplén o relleno, que soporta la estructura de pavimento, conformada con suelos de características aceptables y que son compactadas por capas para disminuir los espacios vacíos y componer un cuerpo estable en mejor estado, para que pueda soportar el peso proviene del tránsito vehicular sin deformarse. MTC, (2013)

Para el diseño de pavimentos se consideran cuatro factores importantes: el primero es el tránsito, interesa para el dimensionamiento de los pavimentos las cargas más pesadas por eje esperadas en el carril de diseño durante el periodo de diseño adoptado. El segundo factor es el clima, se tienen que considerar los efectos de las lluvias y los cambios de temperatura. Las lluvias por su acción directa en la elevación del nivel freático influyen en la resistencia, la compresibilidad y los cambios volumétricos de los suelos de subrasante especialmente. El tercer factor son los materiales disponibles, que son determinados para la selección de la estructura del pavimento más adecuada con respecto a la economía y técnica. Y el cuarto factor materia de estudio de la investigación es **la subrasante**, de la calidad de esta capa depende en gran parte el espesor que debe tener un pavimento, sea esta flexible o rígida como parámetro de evaluación de esta capa se emplea la capacidad de soporte o resistencia a la deformación y los cambios de volumen de un suelo de subrasante de tipo expansivo pueden ocasionar graves daños en las estructuras que se apoyen sobre éste.” Montejo Fonseca, (2002)

Montejo, (2002) afirma que:

Con frecuencia el ingeniero debe enfrentarse con suelos que tiene que utilizar para una obra determinada y cuyas características le obligan a tomar una de las siguientes posibles decisiones:

- Aceptar el material como se encuentra, pero teniendo en cuenta en el diseño las restricciones impuestas por su calidad.
- Eliminar el material insatisfactorio o abstenerse de usarlo, sustituyéndolo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados o cuando menos que la calidad obtenida sea la deseada.

“Las propiedades importantes para analizar en la subrasante son las propiedades físicas (granulometría, límites de consistencia, densidad, contenido de agua), propiedades de rigidez (módulo resiliente, módulo de elasticidad, CBR), propiedades hidráulicas (coeficiente de drenaje, permeabilidad, coeficiente de expansión).” Menéndez, (2013 b).

Según el CBR se identificarán seis categorías de subrasante MTC, (2013):

Tabla 1: Categorías de la subrasante

CATEGORIAS DE LA SUBRASANTE	CBR
So: Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S1: Subrasante Pobre	De CBR $\geq$ 3% A CBR < 6%
S2: Subrasante Regular	De CBR $\geq$ 6% A CBR < 10%
S3: Subrasante Buena	De CBR $\geq$ 10% A CBR < 20%
S4: Subrasante Muy Buena	De CBR $\geq$ 20% A CBR < 30%
S5: Subrasante Excelente	De CBR $\geq$ 30%

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la subrasante suelos con CBR igual o mayor de 6%. La tabla 1, muestra las categorías de clasificación de la sub rasante, según la capacidad de soporte del suelo en porcentaje.



Figura 3: Sección transversal- Pavimento flexible

Fuente: Lambe, Mecánica de suelos



## Características fundamentales a tomar en cuenta de la sub rasante

### a) Humedad natural

La determinación del contenido de humedad natural nos permitirá comparar con el contenido de humedad óptima que se obtendrá en los ensayos próctor para obtener el CBR del suelo. Si la humedad natural resultante fuera igual o inferior a la humedad óptima, el especialista planteará la compactación normal del suelo y la aportación de la cantidad de agua necesaria. Pero si la humedad natural resultara superior a la humedad óptima y, de acuerdo a la saturación del suelo, se planteará incrementar la energía de compactación, sustituir el material saturado o airear el suelo. MTC, (2013, pág. 121).

### b) Granulometría

Son los granos que conforman un suelo, van desde los más grandes que se pueden coger fácilmente con las manos, hasta los granos más pequeños como limos y arcillas. A partir del cual se puede evaluar con mayor o menor aproximación las de más propiedades necesarias para la clasificación de suelos. MTC, (2013, pág. 30).

### c) La plasticidad

“La plasticidad resulta de la diferencia porcentual entre el límite líquido y el plástico. El Índice plástico representa el rango de humedad en el cual una fracción fina se encuentra en estado plástico”. Braja, (2013)

### Granulometría:

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos que lo constituyen, clasificados en función de su tamaño.

“En suelos gruesos (gravas, arenas y limos no plásticos), de estructura simple, la característica más importante para definir su resistencia es la compacidad y la angulosidad de los granos, evidentemente, cualquier análisis por mallas no da ninguna información sobre estos aspectos, pero si dan una referencia acerca de las distribuciones granulométricas.” Rico y Del Castillo, (2005).

“Una adecuada distribución granulométrica garantiza un buen comportamiento de suelo ante el efecto de las cargas. El suelo requiere de un porcentaje importante de grava para soportar las cargas,



un porcentaje de arena para llenar los vacíos entre las gravas y, necesariamente un porcentaje de finos plásticos para cohesionar los materiales del suelo.” MTC, (2013 b)

La curva granulométrica puede proporcionar información acerca del comportamiento del suelo. Si estudiamos la regularidad de la curva podremos diferenciar dos tipos de granulometría:

**Granulometría discontinua:**

La curva presenta picos y tramos planos, que indican que varios tamices sucesivos no retienen material, en este caso se habla de suelos **mal graduados**. Los suelos arcillosos es un claro ejemplo de ese tipo de suelos. MTC, (2008 a)

**Granulometría continua:**

Todos los tamices retienen material por lo que la curva adopta una disposición suave y continua. A este tipo de suelos se le denomina **bien graduados**. MTC, (2008 a)

**Coefficiente de curvatura:**

Es la relación del diámetro efectivo por donde pasa el 30% en peso de la totalidad de la muestra al cuadrado, entre el producto de diámetros efectivos por donde pasa el 60% y 10%. MTC, (2008 a)

**Coefficiente de uniformidad:**

Definido por Hazen como la relación entre las aberturas de tamices por donde pasan el 60% y el 10% en peso de la totalidad de la muestra analizada, si el coeficiente es menor a 2 se considera muy uniforme y si es menor a 5 se define como suelo uniforme. MTC, (2008 a)

En la imagen 3 se puede apreciar el comportamiento de las distribuciones granulométricas con una comparación entre los suelos bien y mal graduados.

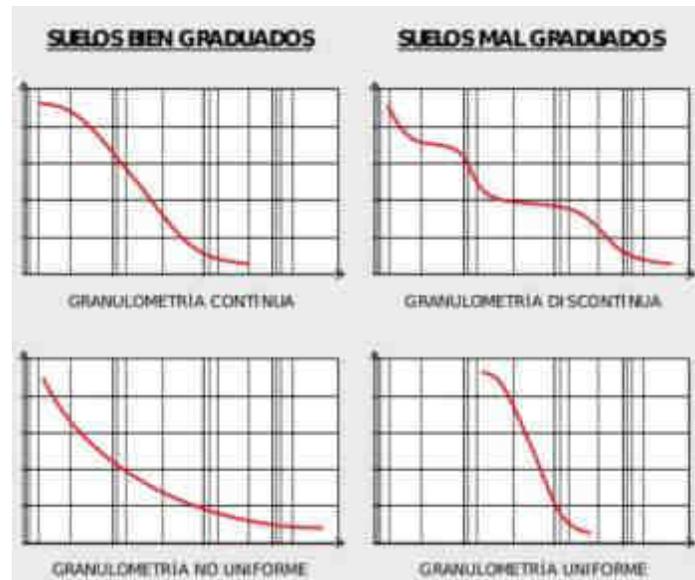


Figura 4: Interpretación de la curva granulométrica

Fuente: MTC (2013-B)

### La plasticidad:

“La plasticidad se obtiene como un índice de la diferencia porcentual entre el límite líquido y el plástico. El Índice plástico representa el rango de humedad en el cual una fracción fina se encuentra en estado plástico.” Braja, (2001)

El límite líquido se determina mediante el método de la cuchara de Casagrande, el ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que pueda contener una pasta formada por 100 g. de suelo seco pasante la malla No 40. Braja, (2001)

Casagrande (1932) concluyó que cada golpe en un depósito estándar para límite líquido corresponde a una resistencia cortante del suelo de aproximadamente  $1 \text{ g/cm}^2$ ; por consiguiente, el límite líquido de un suelo de grano fino da el contenido de agua para el cual la resistencia cortante del suelo es aproximadamente de  $25 \text{ g/cm}^2$ . El límite líquido se toma como el valor de la humedad, para el cual la cohesión es aprox.  $2 \text{ kpa}$ .” Braja, (2001).

El límite plástico, se define como el contenido del agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrolado en rollitos de 3.2mm de diámetro se desmorona, el límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo.



El límite plástico corresponde al valor de la humedad, para el cual la cohesión es aprox. 200 kpa. Resulta muy útil estudiar los límites entre los diversos estados de consistencia que pueden darse en los suelos en función de su grado de humedad: líquido, plástico, semisólido y sólido. El análisis granulométrico no permite apreciar esta característica por lo que es necesario determinar los Límites de Atterberg. A través de este método, se definen los límites correspondientes a los tres estados en los cuales puede presentarse un suelo: líquido, plástico o sólido. (Braja, 2001)

Estos límites, llamados límites de Atterberg, son: el límite líquido (LL) determinación según norma MTC E 110, el límite plástico (LP) determinación según norma MTC E 111 y el límite de contracción (LC) determinación norma MTC E 112.

Además del LL y del LP, una característica a obtener es el Índice de plasticidad IP que se define como la diferencia entre LL y LP:  $IP = LL - LP$

“El índice de plasticidad permite clasificar bastante bien un suelo. Un IP grande corresponde a un suelo muy arcilloso similar a los suelos de la presente investigación. Por el contrario, un IP pequeño es característico de un suelo poco arcilloso.” MTC, (2008- a).

*Tabla 2: Índice de plasticidad*

<b>Índice de Plasticidad</b>	<b>Plasticidad</b>	<b>Característica</b>
$IP > 20$	Alta	Suelos muy arcillosos
$7 < IP < 20$	Media	Suelos arcillosos
$IP < 7$	Baja	Suelos poco arcillosos
$IP = 0$	No plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: MTC (2008-a)

#### **Equivalente de arena:**

“Es un ensayo que da resultados parecidos a los obtenidos mediante la determinación de los límites de Atterberg, aunque menos preciso. Tiene la ventaja de ser muy rápido y fácil de efectuar, según la norma MTC E 114.” MTC, (2008 b)

El valor de EA es un indicativo de la plasticidad del suelo, en la tabla 3 podemos caracterizar a un suelo según el valor del EA.



Tabla 3: Equivalente de arena

Equivalente de arena	Característica
Sí EA > 40	El suelo no es plástico, es de arena
Sí 40 > EA > 20	El suelo es poco plástico y no heladizo
Sí EA < 20	El suelo es plástico y arcilloso

Fuente: (MTC-2008 b)

### Índice de grupo:

Es un índice adoptado por AA\$HTO de uso corriente para clasificar suelos, está basado en gran parte en los límites de Atterberg. Braja, (2001)

Braja, (2001) menciona que para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (IG). El índice de grupo está dado por la siguiente fórmula:

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

- IP: Índice de plasticidad
- LL: Límite líquido
- IP: Índice de plasticidad

El primer término de la ecuación es el índice de grupo parcial determinado a partir del límite líquido. El segundo término a partir del índice de plasticidad.

“El IG de suelos que pertenecen a los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4., A-2-5 y A- 3, siempre es cero. Al calcular IG para suelos que pertenecen a los grupos A- 2-6 y A-2-7, se usa solo el segundo componente de la fórmula.” Braja, (2001)

MTC, (2008) menciona que el índice de grupo es un valor entero positivo, comprendido entre 0 y 20 o más. Cuando el IG calculado es negativo, se reporta como cero. Un índice cero significa un suelo muy bueno y un índice igual o mayor a 20, un suelo no utilizable para carreteras. En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material para subrasante es inversamente proporcional al IG. En la tabla 4 se puede categorizar la calidad del suelo de subrasante en función del valor del IG, para lo cual nos dan un rango de valores.



Tabla 4: Índice de grupo y suelo de subrasante

Índice de grupo	Suelo de subrasante
IG > 9	Muy pobre
IG está entre 4 - 9	Pobre
IG está entre 2 - 4	Regular
IG está entre 1 - 2	Bueno
IG está entre 0 - 1	Muy bueno

Fuente: (MTC 2008 a)

### **Humedad natural:**

Otra característica importante de los suelos es su humedad natural pues la resistencia de los suelos de subrasante, en especial de los finos, se encuentra directamente asociada con las condiciones de humedad y densidad que estos suelos presenten. Se determinará mediante la norma MTC E 108.

La determinación de la humedad natural permitirá comparar con la humedad óptima que se obtendrá en los ensayos Proctor para obtener el CBR del suelo. MTC, (2013).

“Sí la humedad natural resulta igual o inferior a la humedad óptima, el especialista propondrá la compactación normal del suelo y el aporte de la cantidad conveniente de agua. Si la humedad natural es superior a la humedad óptima y, según la saturación del suelo, se propondrá aumentar la energía de compactación, airear el suelo o reemplazar el material saturado.” MTC, (2013).

### **Clasificación de los suelos:**

"Una adecuada y rigurosa clasificación permite al ingeniero de carreteras tener una primera idea acerca del comportamiento que cabe esperar de un suelo como cimiento del firme". Bañon, (2010)

Determinadas las características de los suelos, se podrá estimar con suficiente aproximación el comportamiento de los suelos, especialmente con el conocimiento de la granulometría, plasticidad e índice de grupo y, luego clasificar los suelos. MTC, (2013).

La clasificación de los suelos se efectuará bajo el sistema mostrado en el siguiente cuadro. Esta clasificación permite predecir el comportamiento aproximado de los suelos que contribuirá a delimitar los sectores homogéneos desde el punto de vista geotécnico. MTC, (2013).



A continuación, en la tabla 5 se presenta una correlación de dos sistemas de clasificación más difundido, AASHTO y ASTM:

*Tabla 5: Clasificación de suelos AASHTO y ASTM*

<b>Clasificación de suelos AASHTO</b>	<b>Clasificación de suelos ASTM</b>
A - 1- a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A - 1- b	GM, GP, SM, SP
A - 2	GM, GC, SM, SC
A - 3	SP
A - 4	CL, ML
A - 5	ML, MH, CH
A - 6	CL, CH
A - 7	OH, MH, CH

Fuente: MTC (2013)

### **Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)**

El sistema SUCS o conocido como clasificación ASTM fue presentado por el ingeniero austriaco Arthur Casagrande en el año 1942 para la realización de aeropuertos. Este sistema de clasificación (SUCS) se utiliza para describir la textura y el tamaño del suelo, se divide en partículas finas, partículas gruesas, suelos orgánicos y se utiliza para casi todos los trabajos de geotecnia. MTC, (2013)

El sistema de clasificación SUCS divide a los suelos en grava y finos, en función del suelo pasante de la malla N° 200. Los suelos de partículas entre 4.75 mm hasta 76.2 mm lo clasifica en gravas y arenas, a su vez lo clasifica dependiendo al porcentaje de finos que pasa por el tamiz N° 200. Para su clasificación se hace uso de la granulometría de suelo mediante el tamizado. MTC, (2013)

### **Compactación**

“La compactación es el proceso artificial/mecánico, por el cual se pretende obtener mejores características en los suelos que constituyen la sección estructural de las carreteras, de tal manera que la obra resulte duradera y cumpla con el objetivo por el cual fue proyectada.” Montejo, (2002).

“Este proceso implica la reducción de vacíos por pérdida de aire, conduciendo a cambios de volumen de importancia; no todo el aire sale del suelo y por lo general, no se expulsa agua por lo que la condición de un suelo compactado en carretas es la de un suelo parcialmente saturado.” Rico, (2005).

#### a) Prueba Proctor estándar

En la prueba Proctor, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 943.3 cm<sup>3</sup>. El diámetro del molde es de 101.6mm. Durante la prueba de laboratorio, el molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior (figura 5) El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pisón que transmite 25 golpes a cada capa. El pisón pesa 24.4 N y tiene una altura de caída de 304.8mm. AASHTO, (1993)

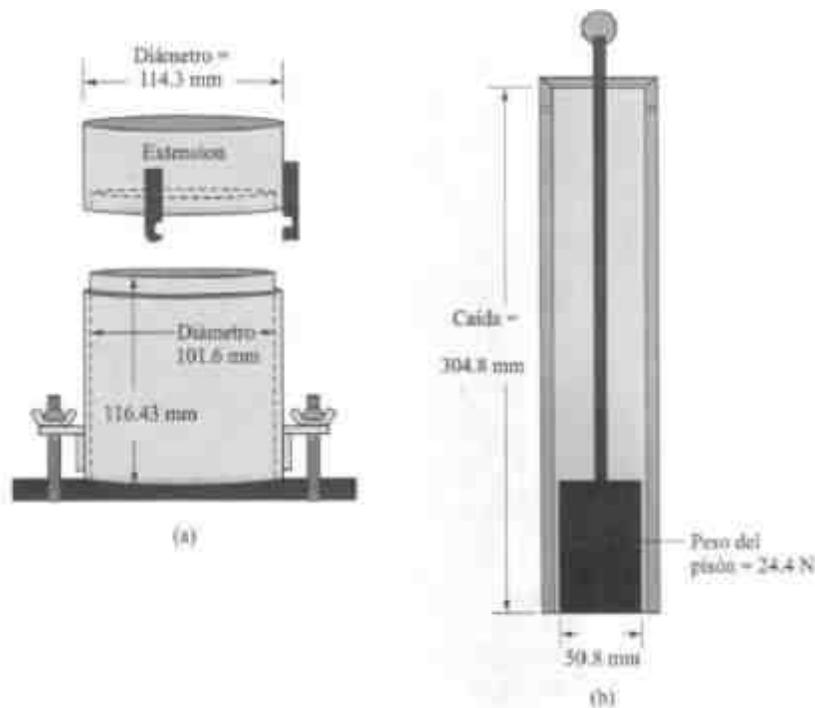


Figura 5: Equipo de la prueba de Proctor Estándar: (a) molde; (b) pisón

Fuente: AASHTO, (1993)

#### b) Prueba Proctor modificado

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación de campo, la Prueba Proctor Estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. A ésta se llama prueba



Proctor modificada (Prueba D-1557 de la ASTM y Prueba T-180 de la AASHTO). Para llevar a cabo la prueba Proctor modificada se usa el mismo molde, con un volumen de  $943.3 \text{ cm}^3$ , como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo compactado en cinco capas por un pisón que pesa  $44.5 \text{ N}$ . la caída del martillo es de  $457.2 \text{ mm}$ . El número de golpes de martillo por capa es de 25 como en el caso de la prueba Proctor estándar. La energía de compactación por volumen unitario de suelo en la prueba modificada se calcula. AASHTO, (1993)

$$E = \frac{(25 \frac{\text{golpes}}{\text{capa}})(5 \text{ capas})(44.5 \times 10^{-3} \text{ x kn})(0.4572 \text{ m})}{943.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 2696 \text{ kN} - \text{m/m}^3$$

Fuente: AASHTO, (1993)

### c) Valor de soporte California (CBR)

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

### 2.2.2. Subrasantes de suelos arcillosos

“Al hablar de suelos de baja capacidad de soporte, generalmente es cuando encontramos suelos con gran presencia de partículas finas. Se pueden definir como arcillosos aquellos suelos en cuya composición granulométrica tienen un peso especial las partículas pequeñas (tamaño inferior a dos micras). Estas partículas están compuestas en su mayoría por minerales arcillosos, silicatos de hierro, aluminio, magnesio, etc., originados por la alteración química de otros minerales originales.” Gamica, (2002)



### **Propiedades de las arcillas:**

“Las principales peculiaridades de los suelos arcillosos en su comportamiento como material estructural derivadas de su estructura y composición se pueden resumir en lo siguiente: el comportamiento diferente según el nivel de humedad, inestabilidad volumétrica, baja resistencia y baja capacidad portante.” Valle, (2010)

A continuación, se mencionan algunas propiedades de las arcillas los que determinan su comportamiento como tal para poder identificar los problemas.

#### **A. Estructura mineral:**

“Los esquemas básicos de agrupación se componen de láminas muy delgadas de unidades de mallas tetraédricas y octaédricas. Las unidades tetraédricas se componen de iones de sílice rodeados por cuatro átomos de oxígeno equidistantes del mismo constituyendo los vértices de la forma geométrica. Las unidades octaédricas las forman seis grupos hidroxilos (OH) en los vértices rodeando a un átomo de aluminio o magnesio, estas unidades se combinan entre ellas compartiendo caras de los octaedros o vértices de los tetraedros para formar estructuras del tipo laminar, anular o lineal.” Braja, (2001)

Las partículas de arcilla no son eléctricamente neutras y presentan un desequilibrio de las cargas. El hecho de que las agrupaciones elementales se basen en formas tetraédricas u octaédricas no significa que estén totalmente equilibradas eléctricamente, sino que éstas son las formas que minimizan las fuerzas de repulsión que puedan existir entre los átomos. Braja, (2001)

#### **B. La capacidad de cambio de las mismas:**

“Un aumento del pH del entorno aumenta la capacidad de cambio de cationes de un material dado, mientras inhibe o reduce la de aniones.” Ancade, (2002)

#### **C. Las cargas superficiales de las partículas de arcilla:**

“Como consecuencia de los fenómenos de desequilibrio eléctrico en las unidades elementales y del intercambio iónico en las estructuras de los suelos arcillosos, es usual que se presenten dos circunstancias con gran importancia en cuanto a su comportamiento eléctrico.” López, (2010).



#### **D. La "capa doble":**

“La atracción de cationes a la superficie de las arcillas es un fenómeno opuesto a la tendencia de los mismos a distribuirse de manera uniforme en el medio, evitando concentraciones diferenciales.” Braja, (2001).

“Si la arcilla se encuentra en un medio acuoso, ante la presencia de agua libre en el contorno, ésta tiende por ósmosis a aproximarse a la superficie de las partículas, cargada de cationes, - para diluir su mayor contenido salino. Con ello, finalmente se consigue que los cationes se dispersen en el entorno de las partículas de manera que su concentración aumenta progresivamente en dirección perpendicular hacia su superficie. Se crea así una especie de "doble capa" eléctrica: La negativa de la superficie y la positiva proporcionada por la agrupación de cationes en su proximidad, que da nombre a este fenómeno característico de las arcillas.” Braja, (2001).

#### **E. Expansión:**

Se considera suelos expansivos aquellos en los que en una muestra remoldeada y compactada con la densidad y humedad óptimas del ensayo proctor, supere un hinchamiento del 3%. Valle, (2010) Según el porcentaje de expansión del suelo se puede categorizar en "baja" cuando el porcentaje de expansión es menor a 1.5%, "media" cuando esta entre el 1.5 y 5%, "alta" comprendido entre el 5 y 25% y "muy alta" cuando es mayor al 25%. Valle, (2010)

#### **Tipos de arcillas:**

“Existen más de una decena de tipos de arcillas, pero las importantes y frecuentes a encontrar en el campo son la caolinita, la illita y el grupo de las montmorillonitas (esmeclitas), se diferencian principalmente por la plasticidad que presentan, la caolinita tiene baja plasticidad, la illita media plasticidad y las montmorillonitas tienen alta plasticidad.” Valle, (2010).

Valle definió la actividad coloidal (AC) de la arcilla como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje partículas con diámetros menores a 0.002 milímetros, la clasificación según el autor mencionado es:

- Inactivas: cuando la  $AC < 0.75$  (caolinitas)
- Normales: cuando la AC se encuentra entre 0.75 y 1.25 (illitas)
- Activas: cuando la  $AC > 1.25$  (montmorillonitas)



### 2.2.3. Estabilización de suelos

“La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos.” MTC, (2013).

La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización es seguido de un proceso de compactación. MTC, (2013).

A continuación, se describen algunos criterios que recomienda el MTC (2013 b) para establecer la estabilización de suelos:

- Se considerarán como materiales aptos para las capas de subrasante suelos con  $CBR \geq 6\%$ .
- En caso de ser menor, será materia de un estudio para la estabilización, mejoramiento o reemplazo.
- Cuando la capa de subrasante sea arcillosa o limosa y, al humedecerse, partículas de estos materiales puedan penetrar en las capas granulares del pavimento contaminándolas, deberá proyectarse una capa de material anticontaminante de 10 cm de espesor como mínimo o un geotextil.
- Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas.

A continuación, se presentan dos guías referenciales para la selección del tipo de estabilizador, que satisface las restricciones y observaciones de cada tipo de suelo. En la tabla 6 nos recomiendan seleccionar un tipo de estabilizador a partir del tipo de suelo, en la primera columna de la tabla 6 nos muestra la clasificación por área, esto se obtiene del triángulo de gradación obtenido de las intersecciones del porcentaje fino que pasa la malla N°200 y el porcentaje de arena (pasante malla N°4 y retenido, en la N°200) así como se muestra en la figura 2, una vez obtenido el área y con el



dato del tipo de suelo elegimos la fila adecuada para determinar el tipo de estabilizador recomendado y también gracias a las propiedades plásticas del suelo podemos descartar algunos estabilizadores y quedarnos con solo algunos de los que se nos recomienda. MTC, (2013).

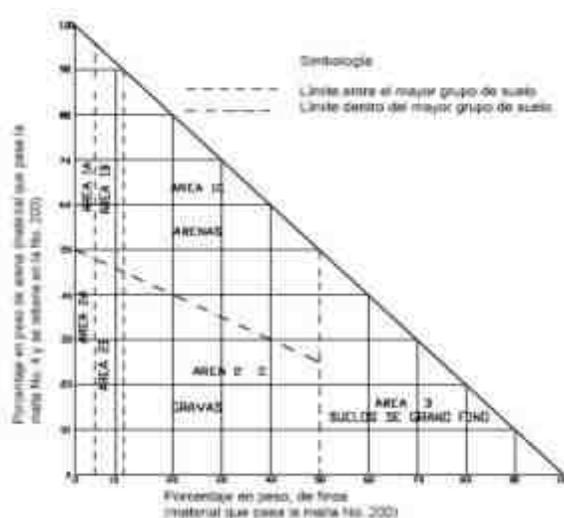


Figura 6: Triangulo de gradación

Fuente: (MTC 2013 b)

### Métodos de estabilización según el MTC:

A continuación, se describen diferentes tipos de estabilizaciones recomendados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, en el manual de carreteras: suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Cada tipo de estabilización se describe de forma resumida y se profundiza más en la estabilización suelo cal por adaptarse más al tipo de suelo estudiado para poder comparar con la estabilización de la presente investigación.

#### i. Estabilización mecánica de suelos

“Con la estabilización mecánica de suelos se pretende mejorar el material del suelo existente, sin cambiar la estructura y composición básica del mismo. Como herramienta para lograr este tipo de estabilización se utiliza la compactación, con la cual se reduce el volumen de vacíos presentes en el suelo.” Ravines, (2010)

“Al compactar un suelo se obtiene: una mayor densidad, por lo que tendremos una mejor distribución de fuerzas que actúan sobre el suelo; una mayor estabilidad, pues al no compactar un



suelo se tendrán asentamientos desiguales por lo tanto inestabilidad de la estructura; una disminución de la contracción del suelo, al existir espacios vacíos, provocando en suelos arcillosos la contracción y dilatación del suelo y por último ocasionará una disminución de los asentamientos.” Ravines, (2010)

**ii. Estabilización por combinación de suelos:**

“La estabilización por combinación de suelos considera la combinación o mezcla de los materiales del suelo existente con materiales de préstamo, con el objetivo de suplir las carencias de gravas o arenas. Los suelos de subrasante analizados en la presente investigación presentan gran presencia de partículas finas y poco de gravas, razón por la cual se adiciona el PET para que pueda cumplir similar función que la grava. (MTC 2013).

El suelo existente se disgregará o escarificará, en una profundidad de quince centímetros (15 cm) y luego se colocará el material de préstamo o de aporte. Los materiales disgregados y los de aporte se humedecerán o airearán hasta alcanzar la humedad apropiada de compactación y previa eliminación de partículas mayores de setenta y cinco milímetros (75 mm), sí las hubiere. Luego se procederá a un mezclado de ambos suelos, se conformará y compactará cumpliendo las exigencias de densidad y espesores hasta el nivel de subrasante fijado en el proyecto.” (MTC 2013).

**iii. Estabilización por sustitución de los suelos:**

“Cuando se prevea la construcción de la subrasante mejorada solamente con material adicionado, pueden presentarse dos situaciones, sea que la capa se construya directamente sobre el suelo natural existente o que éste deba ser excavado previamente y reemplazado por el material de adición. En el primer caso, el suelo existente se deberá escarificar, conformar y compactar a la densidad especificada para cuerpos de terraplén, en una profundidad de quince centímetros (15 cm). Una vez se considere que el suelo de soporte esté debidamente preparado, autorizará la colocación de los materiales, en espesores que garanticen la obtención del nivel de subrasante y densidad exigidos, empleando el equipo de compactación adecuado. Dichos materiales se humedecerán o airearán, según sea necesario, para alcanzar la humedad más apropiada de compactación, procediéndose luego a su densificación. En el segundo caso, el mejoramiento con material totalmente adicionado implica la remoción total del suelo natural existente, de acuerdo al espesor de reemplazo.” (MTC 2008)



El MTC 2013b nos muestra un procedimiento para determinar el espesor de reemplazo en función al valor de soporte, el espesor de material a reemplazar se aplicará solo en casos de subrasantes pobres, con suelos de plasticidad media, no expansivos y con valores soporte entre  $CBR \geq 3\%$  y  $CBR < 6\%$ .

**iv. Estabilización de suelos con cal:**

“El uso de la cal en la estabilización aumenta su capacidad para resistir los efectos inducidos por el tránsito y también mejora las características plásticas haciéndolos más friables y aumentando el valor de soporte.” Ancade, (2002)

“Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento con cal transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables. Adicionalmente, el soporte estructural de los suelos estabilizados con cal puede ser aprovechado en el diseño de pavimentos.” MTC, (2013)

En general casi todos los tipos de suelos susceptibles de estabilizar con cal, pero es más práctico la cal cuando el índice de plasticidad es mayor de 15. La cal produce una disminución de la densidad de los suelos, modifica la plasticidad aumenta la capacidad portante y resistencia al corte del material y reduce su hinchamiento.

La acción de la cal suele explicarse como efectuada por tres reacciones básicas: Menéndez, (2013)

- El primer proceso es la alteración de la película de agua que rodea los minerales de arcilla.
- El segundo proceso es de coagulación o floculación de las partículas de suelo, dado que la cantidad de cal ordinariamente empleada en las construcciones viales resulta de una concentración de ion de calcio mayor que la realmente necesaria.
- El tercer proceso a través del cual la cal afecta el suelo, es su reacción con los componentes del mismo para formar nuevos productos químicos. Los dos principales componentes que reaccionan con la cal son la alúmina y la sílice.

Esta reacción es prolongada en la acción del tiempo y se manifiesta en una mayor resistencia si las mezclas de suelo-cal son curadas durante determinados lapsos de tiempo. Este es conocido como "acción puzolánica". La LIME Nacional Lime Association en su boletín 326 del manual de



estabilización de suelo tratado con cal, explica las reacciones que sucede entre estos elementos, a continuación, se explica los puntos importantes de este manual. LIME, (2006)

ÁREA	CLASE DE SUELO	TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	RESTRICCIÓN EN LL Y IP DEL SUELO	RESTRICCIÓN EN EL PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA 200	OBSERVACIONES
1 A	SW ó SP	(1) Asfalto			
		(2) Cemento Pórtland			
		(3) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 B	SW - SM ó SP - SM ó SW - SC ó SP - PC	(1) Asfalto	IP no excede de 10		
		(2) Cemento Pórtland	IP no excede de 30		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 C	SM ó SC ó SM-SC	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	
		(2) Cemento Pórtland	(b)		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 A	GW ó GP	(1) Asfalto			Solamente material bien graduado.
		(2) Cemento Pórtland			El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 B	GW - GM ó GP - GM ó GW - GC ó GP-GC	(1) Asfalto	IP no excede de 10		Solamente material bien graduado.
		(2) Cemento Pórtland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 C	GM ó GC ó GM - GC	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	Solamente material bien graduado.
		(2) Cemento Pórtland	(b)		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la Malla N° 4.
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-Cemento-Ceniza	IP no excede de 25		
3	CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1) Cemento Pórtland	LL no menor de 40 IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2) Cal	IP no menor de 12		
IP = Índice Plástico (b) $IP \geq 20 + (50 - \text{porcentaje que pasa la Malla N° 200}) / 4$			Sin restricción u observación. No es necesario aditivo estabilizador	Fuente: US Army Corps of Engineers	

Figura 7: Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador

Fuente: MTC, (2014)



TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	NORMAS TÉCNICAS	SUELO <sup>(1)</sup>	DOSEIFICACIÓN <sup>(2)</sup>	CURADO (APERTURA AL TRÁNSITO) <sup>(3)</sup>	OBSERVACIONES
Cemento	EG-CBT-2008 Sección 3068 ASTM C150 AASHTO M85	A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 y A-7 LL < 40% IP ≤ 18% CMO <sup>(4)</sup> < 1.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50% Durabilidad SO <sub>4</sub> Ca <sup>(5)</sup> - AF ≤ 10% - AG ≤ 12% Durabilidad SO <sub>4</sub> Mg - AF ≤ 15% - AG ≤ 18%	2 - 12%	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PCA (Portland Cement Association)
Emulsión	ASTM D2397 ó AASHTO M208	A-1, A-2 y A3 Pasante malla N° 200 ≤ 10% IP ≤ 8% Equiv. Arena ≥ 40% CMO (2) < 1.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.6% Abrasión < 50% Durabilidad SO <sub>4</sub> Ca <sup>(6)</sup> - AF ≤ 10% - AG ≤ 12% Durabilidad SO <sub>4</sub> Mg - AF ≤ 15% - AG ≤ 18%	4 - 8%	Mínimo 24 horas	Cantidad de aplicación a ser definida de acuerdo a resultados del ensayo Marshall modificado o Illinois
Cal	EG-CBT-2008 Sección 3078 AASHTO M216 ASTM C977	A-2-6, A-2-7, A-6 y A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMO <sup>(7)</sup> < 3.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50%	2 - 8%	Mínimo 72 horas	Para IP > 50%, se puede aplicar cal en dos etapas. Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma ASTM D 6276
Cloruro de Calcio	ASTM D98 ASTM D345 ASTM E449 MTC E 1109	A-1, A-2 y A-3 IP ≤ 15% CMO <sup>(8)</sup> < 3.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50%	1 a 3% en peso del suelo seco	24 horas	
Cloruro de Sodio	EG-CBT-2008 Sección 309B ASTM E534 MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 8% ≤ IP ≤ 15% CMO <sup>(9)</sup> < 3.0% Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m <sup>2</sup>	07 días	La cantidad de sal depende de los resultados (dosificación) y tramo de prueba
Cloruro de Magnesio	MTC E 1109	A-1, A-2 y A-3 IP ≤ 15% CMO <sup>(10)</sup> < 3.0% pH mínimo 5 Abrasión < 50%	50 - 80 kg/m <sup>2</sup>	48 horas	La cantidad de sal depende de los resultados de laboratorio (dosificación) y tramo de prueba
Enzimas	EG-CBT-2008 Sección 308B MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 6% ≤ IP ≤ 15% 4.5 < pH < 8.5 CMO <sup>(11)</sup> No debe contener Abrasión < 50% % < N° 200: 10 - 35%	1L / 30-33 m <sup>2</sup>	De acuerdo a Especificaciones del fabricante	
Aceites sulfonados		Aplicable en suelos con partículas finas limosas o arcillosas, con LL bap, arcillas y limos muy plásticos CMO <sup>(12)</sup> < 1.0% Abrasión < 50%		De acuerdo a Especificaciones del fabricante	

Figura 8: Guía complementaria referencial para la selección de tipo de estabilizador

Fuente: MTC, (2014)



#### 2.2.4. La cal

“En un producto resultante de la descomposición de las rocas calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) por la acción del calor. Estas rocas calentadas a más de  $900\text{ }^\circ\text{C}$  se obtiene el óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), conocido con el nombre de cal, producto sólido de color blanco y peso específico de  $3300\text{ Kg/m}^3$ . La cal reacciona violentamente en contacto con el agua, con desprendimiento de calor que alcanza los  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , realizándose la hidratación obteniéndose una pasta blanca llamada cal hidratada o cal apagada. Se forma entonces hidróxido de calcio o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . En la tabla N°02 se describe las propiedades físicas y químicas de la cal.” ICG & GERENCIA, (2010, pág. 3)

##### a. La química del tratamiento con cal

“Cuando la cal y el agua se añaden a un suelo arcilloso, comienzan a ocurrir reacciones químicas casi inmediatamente” (Nacional Lime Association, 2004, pág. 8). Estas reacciones químicas se describen a continuación:

- Secado

“Si se usa cal viva, la misma se hidrata inmediatamente (químicamente se combina con el agua) y libera calor. Los suelos se secan porque el agua presente en el suelo participa en esta reacción, y porque el calor generado puede evaporar la humedad adicional. La cal hidratada producida por estas reacciones iniciales, posteriormente reaccionara subsecuentes, lentamente producirán un secado adicional porque las mismas reducen la humedad mejorando el soporte. Si se utiliza la cal hidratada o la lechada de cal hidratada, en lugar de la cal viva, el secado ocurre solo por cambios químicos del suelo, que producen su capacidad para retener el agua y aumente su estabilidad.” Nacional Lime Association, (2004, pág. 8)

- Modificación

“Después de la mezcla inicial, los iones de calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) de la cal hidratada emigran a la superficie de las partículas arcillosas y desplazan el agua y otros iones. El suelo se hace friable y granular, haciendo más fácil para trabajar y compactar. En esta etapa el índice de plasticidad del suelo disminuye drásticamente “Floculación y aglomeración” generalmente ocurre en el transcurso de horas.” (Nacional Lime Association, 2004, pág. 9)



### **b. Reacción química de la cal con arcillas**

Influencia de la cal en las características de los suelos

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

(Gómez, 2002)

“La primera es la alteración de la partícula de agua que rodea los minerales de arcilla. El segundo proceso es el de coagulación o floculación de las partículas del suelo, dado que la cantidad de cal ordinariamente empleada en las construcciones viales, (del 4% al 10% en peso) resulta una concentración del ion de calcio mayor que la realmente necesaria.”

(Gómez, 2002)

“El tercer proceso a través del cual la cal afecta al suelo, es su reacción con los componentes del mismo para formar nuevos productos químicos, los dos principales componentes que reaccionan con la cal son la alúmina y la sílice. Esta reacción es prolongada en la acción del tiempo y se manifiesta en una mayor resistencia si las mezclas de suelo-cal son curadas durante determinados lapsos de tiempo” (Gómez, 2002).

### **2.2.5. Polímeros reciclados**

Se hace referencia a “polímeros reciclables” a los plásticos, siendo este el único tipo de polímero que en su mayoría puede ser reutilizado, sin embargo, no todos de los diferentes tipos de plástico pueden serlo, ya que algunos de ellos no son aceptados por un centro de reciclaje.

#### **a. Definición:**

Es un polímero no renovable, proveniente del petróleo y procesado con el antimonio para obtener el PET (tereftalato de Polietileno) en pequeñas partículas. El PET es un material duro de degradar, demora alrededor de 700 años en degradarse ya que los microorganismos no tienen mecanismos para atacarlas, no es sino hasta entonces que los enlaces químicos entre los átomos del plástico comienzan a descomponerse. (Crawford et. al2013)

En el Perú según la CENERGIA (Centro de conservación de energía y del ambiente) alrededor de 900,000 toneladas de plástico se desechan en nuestro país, esta cantidad representa 30kg de plástico por ciudadano al año, y se suman cerca de 3 mil millones de bolsas plásticas, casi 6 mil bolsas por



cada minuto, una realidad que hoy en día se ve muy perjudicial para nuestro medio ambiente, lo cual genera propuestas de mejora a nuestro país.

### **b. Tipos de botellas de plástico y su reciclaje:**

“En la actualidad se producen diversas y en distintas presentaciones los frascos descartables, pero estos se pueden clasificar en 7 grupos según los materiales por los cuales fueron elaborados, para identificar esta clasificación en la parte inferior de cada botella descartable se puede apreciar un número con algunas letras. Dichas letras y números indican qué tipo de botella de plástico es y qué tipo de precauciones se debe de tomar al usar ese tipo de botella en particular. Existen 7 tipos de botellas según los componentes que lo componen y según los usos que se le dan.” (web: Blog Verde)

#### **b.1. PET o PETE (tereftalato de polietileno):**

Las botellas de plástico de PET, que están hechas de tereftalato de polietileno, tienen el número "uno" en ellas, están hechas de un plástico fuerte y durable que es bueno por su portabilidad. Las botellas de plástico de PET se usan principalmente para refrescos, bebidas deportivas, agua y jugo. Sus principales propiedades son: la alta resistencia al desgaste y corrosión, buena resistencia química y térmica. En la imagen 1 se aprecia la imagen típica de este tipo de botellas los cuales fueron utilizados para la presente investigación y también se puede apreciar el símbolo de reciclaje con el número uno y la letra PET. Crawford, (2013)



*Figura 9: Frasco típico y símbolo de reciclaje (PET)*

Fuente: Crawford, (2013)

### **b.2. HDPE (polietileno de alta densidad):**

Las botellas HDPE son las únicas que tienen el número dos impresos en su parte inferior y están hechas de polietileno de alta densidad. Debido a que son botellas de plástico más densas y gracias a su versatilidad y resistencia química se utiliza sobre todo en envases, en productos de limpieza de hogar o químicos industriales, como por ejemplo botellas de champú, detergente, cloro, etc. Las botellas de HDPE (moldes) comenzaron a reemplazar otros tipos de recipientes como el vidrio y el metal en la década de 1970. Crawford, (2013)



*Figura 10: Frasco típico y símbolo de reciclaje (HDPE)*

Fuente: Crawford, (2013)

### **b.3. PVC o V (Vinílicos o cloruro de polivinilo):**

Estas botellas tienen el número tres impresos en la parte inferior, entonces se trata de una botella PVC hecha de policloruro de vinilo. Este tipo de botella de plástico es muy flexible y se usa cuando se sabe que el líquido dentro de ella se expande o contrae, de manera que pueda hacerlo sin romper el plástico. También es muy resistente, por lo que es muy utilizado como envase en limpiadores de ventanas, botellas de detergente, champú, aceites, etc. Crawford, (2013)



*Figura 11: Frasco típico y símbolo de reciclaje (V)*

Fuente: Crawford, (2013)



## 2.4.5. Polímeros PET

### 2.4.5.1. Definición

El tereftalato de polietileno es un plástico de tipo I, el cual es usado mayormente para fabricar envases de bebidas. El PET de manera química es un polímero que resulta de una reacción de policondensación entre el ácido tereftalático y el etilenglicol, donde por su composición, este corresponde al grupo de materiales sintéticos (poliésteres). Quintero, (2016)

### 2.4.5.2. Química del PET

Las iniciales del PET corresponden al polietilenterftalato o politereftalato de etileno donde su fórmula molecular es:  $[-CO-C_6H_4-CO-O-CH_2-CH_2-O-]$ . Quintero, 2016)

### 2.4.5.3. Tipos de PET

Según Quintero se puede diferenciar según su forma de aplicación:

- En la industria textil: Es el suplente de fibras naturales, por sus excelentes cualidades de resistencia, a la deformación y su estabilidad dimensional.
- En envasados: Un ejemplo es las botellas de agua mineral.
- Como materia prima: Se utiliza para el envasado de alimentos.

### 2.4.5.4. Propiedades del PET

- Cristalinidad y transparencia.
- Buena resistencia al desgaste y corrosión.
- Buen coeficiente de deslizamiento.
- Resistencia química y térmica.
- Actúa como barrera de CO<sub>2</sub>, aceptables como barrera al O<sub>2</sub>.
- Es reciclable.

## 2.3. Hipótesis

### 2.3.1. Hipótesis general

El suelo con tereftalato obtiene mayor beneficio que el suelo estabilizado de acuerdo a la norma del MTC en la subrasante de la carretera Maras-Moray.



### **2.3.2. Sub hipótesis**

#### **Sub hipótesis 01**

Las propiedades de la subrasante varían incrementándose principalmente los límites de consistencia al usar tereftalato respecto al estabilizante recomendado por el MTC en la carretera Maras Moray.

#### **Sub hipótesis 02**

Al añadir una dosificación del 2% en el tereftalato, se logrará alcanzar el CBR óptimo para la carretera.

#### **Sub hipótesis 03**

El CBR del suelo con tereftalato es superior en 4% respecto al suelo estabilizado según la norma recomendado por el MTC.

### **2.4. Definición de variables.**

#### **2.4.1. Variables independientes.**

X1: Tereftalato de polietileno

Dosificación en % y cantidad en gr. del tereftalato, y el tipo de suelo para la estructura de la capa superficial de la carretera.

#### **2.4.2. Variables dependientes.**

Y1: Estabilización de la subrasante

Propiedades de la subrasante como el contenido de humedad en %, la granulometría en gr, los límites de atterbergh en %, el proctor modificado en gr/cm<sup>3</sup> y el CBR en %.



2.4.3. Cuadro de operacionalización de variables.

Tabla 6: Operacionalización de variables

VARIABLES DE INVESTIGACIÓN				
VARIABLES	DESCRIPCIÓN	NIVEL	INDICADORES	INSTRUMENTOS
<b><u>VARIABLES INDEPENDIENTES</u></b>				
TEREFTALATO DE POLIETILENO	Diferentes estabilizantes para el mejoramiento estructural del suelo.	Dosificación	Cantidad en peso del tereftalato (gr)	Fichas de laboratorio
		Suelo estabilizado de acuerdo a la norma del MTC	Tipo de suelo	
			Tipo de estabilización	
<b><u>VARIABLES DEPENDIENTES</u></b>				
ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE	Cantidad y dosificación adecuada de el tereftalato para la estructura de la capa superficial de la carretera.	Propiedades de la subrasante	Contenido de humedad	Horno
			Granulometria	Juego de tamices
			LL(%) Porcentaje en peso	Copa de Casagrande
			LP(%) Porcentaje en peso	Vidrio esmerilado
			Gravedad específica	Bomba de vacios
		CBR	Proctor modificado	Norma del MTC

Fuente: Elaboración propia



### **3. Capítulo III: Metodología**

#### **3.1. Metodología de la investigación**

##### **3.1.1. Tipo de investigación**

Según Hernández, R.; Fernández; Baptista, (2010), de acuerdo al tipo de enfoque será CUANTITATIVO, porque los resultados que se recolectan son datos numéricos de las muestras para probar la hipótesis, debido a que se evalúan parámetros que pueden ser medibles, replicables y que reproducidos en las mismas condiciones en cualquier momento permite hacer el uso de datos numéricos.

##### **3.1.2. Nivel de la investigación**

“De acuerdo a los niveles de investigación científica, la presente tesis es una investigación DESCRIPTIVA, debido a que responde a las preguntas ¿Cómo?, ¿Cuánto(s)?, ¿Qué? Etc. También porque se pretendió describir información sobre muestras, Asimismo se refiere a las características, cualidades internas y externas, propiedades o rasgos esenciales de los hechos Según.” Hernández, R.; Fernández; Baptista, (2010).

##### **3.1.3. Método de investigación**

De acuerdo a Hernández, R.; Fernández; Baptista, (2010), se considera el diseño del tipo CUASI-EXPERIMENTAL, ya que se propiciará cambios intencionales en las variables estudiadas. Asimismo, la presente investigación cumple con las mediciones del efecto de la variable independiente en la dependiente (incremento o disminución de la resistencia a compresión).

#### **3.2. Diseño de la investigación**

##### **3.2.1. Diseño metodológico**

“La presente investigación presenta un diseño EXPERIMENTAL, debido a que se tiene un patrón (suelo natural) que se modifica (añadiendo tereftalato de polietileno y cal), para luego, estudiar ambos según.” Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, (2010).

##### **3.2.2. Diseño de ingeniería**

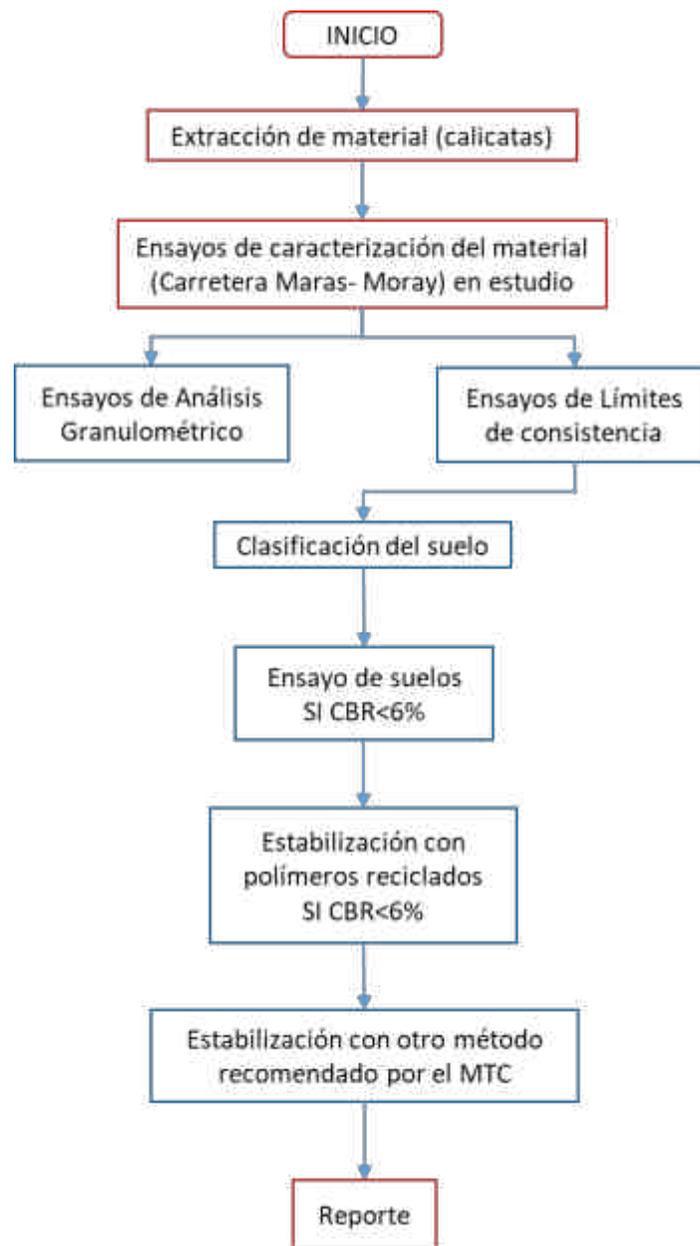
Para realizar la presente investigación se procedió la siguiente secuencia:



La primera parte fue focalizar, ubicar la muestra y hacer el levantamiento de datos en la carretera Maras- Moray, distrito de Maras, provincia de Urubamba, departamento del Cusco.

La segunda parte fue seleccionar la muestra para poder realizar los correspondientes ensayos preliminares y específicos como el Proctor y CBR, para de esa manera llegar a las conclusiones correspondientes de dicha investigación.

Tabla 7: Diseño de ingeniería



Fuente: Elaboración propia



### **3.3.Población y muestra**

#### **3.3.1. Población**

Población: “Es un fenómeno de estudio, incluye la totalidad de unidades de análisis o entidades de población que forman dicho fenómeno y que debe cuantificarse para un determinado estudio” (Rangel y Giler, 2010, p. 176).

##### **3.3.1.1.Descripción de la población**

La población de estudio es la subrasante de la carretera afirmada “Maras- Moray”, en el distrito de Maras, provincia de Urubamba y departamento del Cusco, con una longitud aproximada de 7.845km.

##### **3.3.1.2.Cuantificación de la población**

La población se cuantifica como el total del suelo de la carretera afirmada “Maras- Moray”, no mezclado y mezclado con tereftalato de polietileno y cal, en el distrito de Maras, provincia de Urubamba y departamento del Cusco.

#### **3.3.2. Muestra**

Muestra: “Una muestra es un subconjunto de la población, que se obtiene para investigar las propiedades o características de toda la población” (Tamayo, 2012, p. 176).

##### **3.3.2.1.Descripción de la muestra**

La muestra que se analiza en dicha investigación, son los 2 tramos de la carretera afirmada “Maras- Moray”, en ciertos tramos de la carretera se presenta altos contenidos de arcilla y por tal motivo presenta baja capacidad de soporte.

##### **3.3.2.2.Cuantificación de la muestra**

La muestra se cuantifica en 2 tramos de la carretera afirmada, con un total de 4 calicatas ubicados en el Km 03+580 a Km 04+310, Km 05+430 a Km 06+120, las cuales se obtuvieron de los tramos más críticos de la carretera, como pueden ser presencia de lodazales, inestabilidad de taludes, presencia de numerosos accidentes de tránsito en dicho lugar, todo esto con el propósito de



encontrar el tipo de suelo que cumpla con las características en sus propiedades geotécnicas adecuadas para llevar un buen término a la investigación.

### **3.3.2.3. Método de muestreo**

“El método de muestreo fue NO PROBABILÍSTICO, porque la elección de la cantidad de muestras no dependió de la probabilidad, sino, se realizó en base a la repetitividad de los resultados de los ensayos, la importancia de estos y la accesibilidad a ellos.” (Hernández Sampieri, Fernández, Collado & Baptista Lucio, 2006).

### **3.3.2.4. Criterios de evaluación de muestra**

La muestra se evaluó por medio de los siguientes ensayos de laboratorio:

- Análisis granulométrico (MTC E 107)
- Contenido de humedad (MTC E 108)
- Límite líquido (MTC E 110)
- Límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111)
- Gravedad específica (MTC E 113)
- Proctor modificado (MTC E 115)
- CBR (MTC E 132)

### **3.3.3. Criterios de inclusión**

La población y muestra cumple los siguientes criterios:

- Material de la carretera “Maras- Moray” en estado natural compactado y sin compactar.
- Mezclas de suelo- tereftalato de polietileno y suelo- cal, compactadas elaborados con el material de la carretera “Maras- Moray”, tereftalato de polietileno y cal.

## **3.4. Instrumentos**

### **3.4.1. Instrumentos metodológicos**

Los instrumentos metodológicos que se utilizaron en la investigación fueron formatos de recolección y procesamiento de datos, estos se describen a continuación:



- Formato N° 01- Ensayo de análisis granulométrico (MTC E 107)

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>							
<i>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO</i>							
FORMATO							
<b>ENSAYO: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO (MTC E 107)</b>							
(MTC E-107 / ASTM D-422: Standard Test Method for Particle-size Analysis of Soils. )							
<b>Proyecto:</b>	"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".					<b>Código Ensayo N°:</b>	(C-01)-01
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas						
	Bach. Paul Herrera Huarancca						
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>	
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>		Dr. Victor Chacón Sánchez	
<b>TAMAÑO</b>		gr.	gr.	%	%	%	<b>Calicata N°:</b>
MALLA	MALLA	PESO	RETENIDO	RETENIDO	QUE		01
ASTM	ASTM	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA		<b>Peso de la muestra:</b>
3"	76.20						<b>Peso de la muestra secada al aire (W):</b>
2 1/2"	63.50						<b>Peso de la muestra lavada y secada al horno (Wo):</b>
2"	50.60						<b>(W-Wo):</b>
1 1/2"	38.10						
1"	25.40						
3/4"	19.05						
1/2"	12.70						
3/8"	9.53						
1/4"	6.35						
<b>No4</b>	<b>4.76</b>						
No8	2.38						
No10	2.00						
No16	1.19						
No20	0.84						
No30	0.59						
No40	0.42						
No 50	0.30						
No60	0.25						
No80	0.18						
No100	0.15						
No200	0.07						
<b>FONDO</b>							
<b>TOTAL</b>							
<b>W-Wo</b>							

Figura 12: Ensayo de análisis granulométrico (MTC E 107)



- Formato N° 02- Ensayo de contenido de humedad (MTC E 108)

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
		<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>					
		<i>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO</i>					
		FORMATO					
		<b>ENSAYO: DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO (MTC E 108)</b>					
		(MTC E-108 / ASTM D-2216: Standard Test Method of Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock. )					
<b>Proyecto:</b>	"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".				<b>Código Ensayo N°:</b>		
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas Bach. Paul Herrera Huarancca						
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>	
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>		Dr. Víctor Chacón Sánchez	

Determinación: CONTENIDO DE HUMEDAD w%			
Tara			
Peso del suelo húmedo + tara			
Peso del suelo seco + tara			
Peso de la tara			
Peso del suelo seco			
Peso de agua			
Contenido de humedad %			

Contenido de humedad =

*Figura 13: Ensayo de contenido de humedad (MTC E 108)*



- Formato N° 03- Ensayo de límite líquido (MTC E 110)

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>							
<i>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO</i>							
FORMATO							
<b>ENSAYO: DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (MTC E 110)</b>							
(MTC E-110 / NTP 339.129)							
<b>Proyecto:</b>	"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".					<b>Código Ensayo N°:</b>	
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas Bach. Paul Herrera Huarancca						
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>	
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>		Dr. Victor Chacón Sánchez	

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO				
Tara				
Peso del suelo húmedo + tara				
Peso del suelo seco + tara				
Peso de la tara				
Peso del suelo seco				
Peso de agua				
Contenido de humedad %				
Número de golpes, N				
Recomendación de intervalo de golpes				

Límite líquido =

*Figura 14: Ensayo de límite líquido (MTC E 110)*



- Formato N° 04- Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111)

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
		<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>					
		<i>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO</i>					
		FORMATO					
		<b>ENSAYO: DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO (L.P) DE LOS SUELOS E INDICE DE PLASTICIDAD (I.P.) (MTC E 111)</b>					
		(MTC E-111 / NTP 339.129)					
<b>Proyecto:</b>	“EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA”.				<b>Código Ensayo N°:</b>		
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas						
	Bach. Paul Herrera Huarancca						
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>	
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>		Dr. Víctor Chacón Sánchez	

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO		
Tara		
Peso del suelo húmedo + tara		
Peso del suelo seco + tara		
Peso de la tara		
Peso del suelo seco		
Peso de agua		
Contenido de humedad %		

Límite plástico =

Índice de plasticidad =

*Figura 15: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad (MTC E 111)*



- Formato N° 05- Ensayo de gravedad específica (MTC E 113)

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
		<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>					
		<i>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO</i>					
		FORMATO					
		<b>ENSAYO: MÉTODO DE ENSAYO ESTENDAR PARA LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS DE SUELO MEDIANTE PICNÓMETRO DE AGUA (MTC E 113)</b>					
		(MTC E-113 / NTP 339.131)					
<b>Proyecto:</b>	"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".				<b>Código Ensayo N°:</b>		
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas						
	Bach. Paul Herrera Huaranca						
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>	
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>		Dr. Victor Chacón Sánchez	

GRAVEDAD ESPECÍFICA			
Capacidad del picnómetro (cm <sup>3</sup> )			
Peso del suelo seco (gr)			
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)			
Temperatura ( C )			
Peso del frasco + peso del agua (gr)			
Corrección por temperatura (K)			
Peso específico relativo de sólidos (Gs)			
Gs			

Gravedad específica =  g/cm<sup>3</sup>

Figura 16: Ensayo de gravedad específica (MTC E 113)



- Formato N° 06- Ensayo de Proctor modificado (MTC E 115)

	<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b>					
<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b>						
<i>LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO</i>						
FORMATO						
<b>ENSAYO: COMPACTACIÓN DE SUELOS UTILIZANDO UNA ENERGIA MODIFICADA (PROCTOR MODIFICADO)</b>						
<b>(MTC E 115)</b>						
(MTC E-115 / NTP 339.141/ ASTM D 1557)						
<b>Proyecto:</b>	"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".			<b>Código Ensayo N°:</b>	(C-01)-10	
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas Bach. Paul Herrera Huarancca					
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>	03/03/20	Dr. Victor Chacón Sánchez
Descripción:		Molde N°:		MÉTODO APLICADO		
N° capas:		N° golpes:				
Peso de pizón:		Altura de caída:				
Ensayo	1	2	3	4	5	
Peso del suelo + molde (gr)						
Peso del molde (gr)						
Peso de la muestra húmeda (gr)						
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )						
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )						
Recipiente N°						
Peso muestra húmeda + tara (gr)						
Peso muestra seca + tara (gr)						
Peso del agua (gr)						
Peso de la tara (gr)						
Peso de la muestra seca (gr)						
Contenido de humedad (%)						
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )						
Resultados:						
DMS (gr/cm <sup>3</sup> ):						
CHO (%):						

Figura 17: Ensayo de proctor modificado (MTC E 115)



- Formato N° 07- Ensayo de CBR (MTC E 132)

		<b>UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL</b> LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO								
FORMATO										
<b>ENSAYO: CBR SUELOS (MTC E 132)</b>										
(MTC E-132 / ASTM D 1883) Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.										
<b>Proyecto:</b>	"EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".					<b>Código Ensayo N°:</b>				
<b>Solicitantes:</b>	Bach. Jhoel David Quispe Salas Bach. Paul Herrera Huarancca									
<b>Ubicación:</b>	Carretera Maras- Moray	<b>Calicata:</b>	C-01	<b>Préstamo</b>	Sub. trocha carrozable	<b>Asesor de tesis y responsable:</b>				
<b>Ubicación:</b>	Coordenadas UTM: ESTE-807691; NORTE-8524070	<b>Profundidad:</b>	1.50 Mts	<b>Fecha:</b>		Dr. Víctor Chacón Sánchez				
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA MUESTRA DE ENSAYO</b>										
<b>Granulometría de la muestra</b>		<b>Límites de Atterberg:</b>								
Tamices	% Pasante	Límite líquido (MTC E 110) :								
2"		Índice plástico (MTC E 111):								
3/8"		Clasificación de suelos:								
Nº4		SUCS (ASTM D 2487):								
Nº10		AASHTO (ASTM D 3282):								
Nº40										
Nº200										
<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO</b>										
Descripción	Especimen N°1	Especimen N°2	Especimen N°3	Especimen N°4	Especimen N°5	Especimen N°6	Especimen N°7	Especimen N°8	Especimen N°9	
E. compact(kg/cm3)										
Densidad seca										
Humedad de penetración										
Humedad de compactación										
Absorción										
Expansion										
Tiempo de embebido										
<b>RESUMEN DE LOS RESULTADOS EN ENSAYO</b>										
<b>Proctor modificado</b>										
Metodo de compactacion B										
Maxima densidad seca: 1.9095										
Optimo contenido de humedad:11.50 %										
<b>C.B.R a 2.54 mm de penetracion</b>					<b>C.B.R a 5.08 mm de penetracion</b>					
C.B.R al 95% de la M.D.S: 5.80%					C.B.R al 95% de la M.D.S: 7.85%					(ENSAYO N°1)
C.B.R al 95% de la M.D.S: 5.84%					C.B.R al 95% de la M.D.S: 8.20%					(ENSAYO N°2)
C.B.R al 95% de la M.D.S: 5.65%					C.B.R al 95% de la M.D.S: 8.10%					(ENSAYO N°3)
C.B.R al 95% de la M.D.S: 5.76%					C.B.R al 95% de la M.D.S: 8.05%					(PROMEDIO)



- Formato N° 08- Ensayo de CBR (MTC E 132)

Molde N°									
Capas N°									
Golpes por capa N°									
Condicion de la muestra									
Peso de molde + Suelo humedo (g)									
Peso de molde (g)									
Peso del suelo humedo (G)									
Volumen del molde (cm3)									
Densidad humeda (g/cm3)									
Tara N°									
Peso suelo humedo + tara (g)									
Peso suelo seco + tara (g)									
Peso de tara (g)									
Peso de agua (g)									
Peso del suelo seco (g)									
Contenido de humedad %									
Densidad seca (g/cm3)									

**ETAPA DE PENETRACIÓN**

Ensayo N° 1									
F.Anillo	Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area								
Lectura	Penetracion		Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
	Pug	mm		Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°			min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

Ensayo N° 2									
F.Anillo	Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area								
Lectura	Penetracion		Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
	Pug	mm		Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°			min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2

Figura 18: Ensayo de CBR (MTC E 132)

### 3.4.2. Instrumentos de ingeniería

Los instrumentos de ingeniería utilizados en la investigación fueron los equipos y herramientas para realizar todos los ensayos.

Los instrumentos utilizados para los ensayos en suelo natural se observan en las tablas siguientes:

*Tabla 8: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de análisis granulométrico*

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de análisis granulométrico	
	
Balanza	Juego de tamices
	
Cepillo metálico	Balanza de precisión

*Tabla 9: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico*

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico	
	
Tamiz N° 40	Taras



Tabla 9: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico

	
Vasija de porcelana	Copa de Casagrande
	
Horno	Espátula
	
Acanalador	Balanza de precisión

Tabla 10: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite líquido

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite líquido	
	
Taras	Vidrio Esmerilado



Tabla 10: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite líquido

	
Balanza de precisión	Horno

Tabla 11: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de gravedad específica

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de gravedad específica	
	
Fiola y embudo	Bomba de vacíos
	
Horno	Tamiz N° 04

Tabla 12: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de proctor modificado

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de proctor modificado	
	
Tamiz de 3/4''	Molde de 4''



Tabla 12: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de proctor modificado

	
Recipiente metálico	Pisón
	
Horno	Extractor
	
Balanza	Herramientas manuales

Tabla 13: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural	
	
Tina de agua	Disco espaciador



Tabla 13: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural

 <p>Pisón</p>	 <p>Molde de CBR</p>
 <p>Juego de pesas</p>	 <p>Trípode y deformímetro</p>
 <p>Herramientas manuales</p>	 <p>Prensa de CBR</p>

Los instrumentos utilizados para los ensayos del suelo natural con tereftalato de polietileno se observan en las tablas siguientes:

Tabla 14: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural con PET

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de suelo natural con tereftalato de polietileno	
 <p>Tereftalato de polietileno</p>	 <p>Molde de CBR</p>



Tabla 14: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural con TET

 <p>Juego de pesas</p>	 <p>Pisón</p>
 <p>Trípode y deformímetro</p>	 <p>Disco espaciador</p>
 <p>Prensa de CBR</p>	 <p>Herramientas manuales</p>

Los instrumentos utilizados para los ensayos del suelo natural con cal se observan en las tablas siguientes:

Tabla 15: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico con cal

Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico con cal	
 <p>Cal</p>	 <p>Vasija de porcelana</p>



Tabla 15: Instrumentos de ingeniería para el ensayo de unímero plástico con cal

	
Acanalador	Tamiz N° 40
	
Copa de Casagrande	Espátula
	
Horno	Taras

### 3.5. Procedimientos de recolección de datos.

El procedimiento para la recolección de los datos fue el siguiente:

1. Caracterización del material.
2. Selección del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno.
3. Selección del porcentaje óptimo de la cal.

#### 3.5.1. Caracterización del material

##### 3.5.1.1. Extracción del material de la carretera.

El material extraído se ubica en la Carretera Maras- Moray, perteneciente al tramo del Emp. CU-1166 de la Red Vial Nacional, tiene como inicio en la capital del distrito Maras, y permite la



interconexión entre dicha población y el Centro Arqueológico de Moray en la provincia de Urubamba del departamento de Cusco.

El objetivo es obtener una muestra representativa mediante procedimientos normados por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

**Referencias normativas:**

- MTC E 101: Guía para muestreo de suelos y rocas.

**a) Equipos y materiales utilizados en la prueba:**

- Baldes de cierre hermético
- Herramientas manuales
- Herramientas de escritorio

**b) Procedimiento:**

- En base a la observación de zonas deterioradas, zonas lodazales afectadas por la lluvia, y zonas donde se presentó numerosos accidentes de tránsito, se distinguieron 02 tramos críticos.
- De los 2 tramos considerados, se realizó 2 calicata por tramo.
- Las muestras extraídas se obtuvieron a 1.5m del nivel de terreno de la carretera.
- Una vez obtenido todas las muestras, se trasladaron al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Asfalto de la Universidad Andina del Cusco, para sus respectivos ensayos.



*Figura 19: Calicata N° 01- km 03+580 “a)”, Calicata N°02-km 04+310 “b)”*



Figura 20: Calicata N°03-km 05+430 “c)”, Calicata N°04-km 06+120 “d)”

### 3.5.1.2. Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad es un ensayo rutinario de laboratorio para determinar la cantidad de agua presente en una cantidad dada de suelo en términos de su peso en seco.

#### Referencias normativas

- ASTM D 2216: Standard Test Method of Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock.

#### a) Equipos y materiales utilizados en la prueba:

- Horno de secado. - Horno de secado termostáticamente controlado, de preferencia uno del tipo tiro forzado, capaz de mantener una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.
- Balanzas.- De capacidad conveniente y con aproximación de 0,01 g para muestras de menos de 200 g.

#### b) Procedimiento

- Determinar y registrar la masa de un contenedor limpio y seco (y su tapa si es usada).
- Colocar el espécimen de ensayo húmedo en el contenedor y, si se usa, colocar la tapa asegurada en su posición. Determinar el peso del contenedor y material húmedo usando una balanza, seleccionada de acuerdo al peso del espécimen. Registrar este valor.



- Remover la tapa (si se usó) y colocar el contenedor con material húmedo en el horno. Secar el material hasta alcanzar una masa constante. Mantener el secado en el horno a  $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  a menos que se especifique otra temperatura.
- Luego que el material se haya secado a peso constante, se removerá el contenedor del horno (y se le colocará la tapa si se usó). Se permitirá el enfriamiento del material y del contenedor a temperatura ambiente o hasta que el contenedor pueda ser manipulado cómodamente con las manos y la operación del balance no se afecte por corrientes de convección y/o esté siendo calentado. Determinar el peso del contenedor y el material secado al horno usando la misma balanza.

### Ecuaciones

La fórmula utilizada para calcular este porcentaje es la siguiente:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de Ingeniería geotécnica

Donde

$W_w$ : es el peso de agua presente en la masa de suelos (gr).

$W_s$ : es el peso de los sólidos en el suelo (gr).

El contenido de humedad nos da una referencia para saber si es mayor o menor del contenido óptimo para poder compactar la subrasante.



Figura 21: Secado del material “a)”, Ensayo de contenido de humedad “b)”



c) Toma de datos

*Tabla 16: Determinación del contenido de humedad de la Calicata N° 01*

<b>Determinación: CONTENIDO DE HUMEDAD w%</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Tara	16	50
Peso del suelo húmedo + tara	0.181	0.236
Peso del suelo seco + tara	0.159	0.203
Peso de la tara	0.067	0.068
Peso del suelo seco	0.092	0.135
Peso de agua	0.022	0.033
<b>Contenido de humedad %</b>	<b>23.91%</b>	<b>24.20%</b>

*Tabla 17: Determinación del contenido de humedad de la Calicata N° 02*

<b>Determinación: CONTENIDO DE HUMEDAD w%</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Tara	56	53
Peso del suelo húmedo + tara	0.1433	0.1944
Peso del suelo seco + tara	0.1288	0.1709
Peso de la tara	0.0701	0.0682
Peso del suelo seco	0.0587	0.1027
Peso de agua	0.0145	0.0235
<b>Contenido de humedad %</b>	<b>24.70%</b>	<b>22.90%</b>

*Tabla 18: Determinación del contenido de humedad de la Calicata N° 03*

<b>Determinación: CONTENIDO DE HUMEDAD w%</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Tara	23	11
Peso del suelo húmedo + tara	0.3201	0.2488
Peso del suelo seco + tara	0.2765	0.2148
Peso de la tara	0.0572	0.0408
Peso del suelo seco	0.2192	0.11742
Peso de agua	0.0432	0.00342
<b>Contenido de humedad %</b>	<b>19.80%</b>	<b>19.50%</b>



### 3.5.1.3. Análisis granulométrico

El objetivo es determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 0.074 mm (N°200).

#### Referencias normativas

- MTC E 107, análisis granulométrico de suelos por tamizado.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

- Tamices de malla cuadrada.
- Balanza con sensibilidad de 0.1 gramo.
- Homo de secado.
- Bandejas, cepillos y brochas.
- Muestra representativa del suelo.

#### Muestra

- El suelo tiene que secar al aire libre.
- Cuartear el suelo secado al aire libre hasta obtener una muestra representativa.

#### b) Procedimientos

- Pesar la muestra representativa (obtenido del cuarteo) y llevarla al horno por 24 horas.
- Se realiza un lavado por la malla N° 200, se echa la muestra en porciones, de forma que no se pierda partículas mayores a 0.074 mm.
- Una vez lavada la muestra por la malla N° 200, el material retenido debe secarse en el horno por 24 horas. Luego de esa etapa, se enfría la muestra y se pesa. Así se obtiene el peso lavado y secado al horno.
- La muestra se echa por la parte superior de la serie de tamices y luego se sacude por espacio de diez a quince minutos. Se debe tener cuidado de no perder material durante el zarandeo.
- Luego de tamizado se procede a pesar el material retenido en cada malla.

#### Ecuaciones

Se calcula el porcentaje retenido en cada tamiz, se aplica la siguiente ecuación:



$$\%retenido = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz}}{\text{Peso total de la muestra}} \times 100$$

Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de Ingeniería geotécnica

Una vez obtenido el porcentaje retenido en cada tamiz se puede calcular el % retenido acumulado para luego calcular el % pasante con una simple diferencia entre el valor de 100 con el% retenido acumulado.

Para poder ver gráficamente el comportamiento de las partículas de un suelo se grafican en un formato semi- logarítmico.

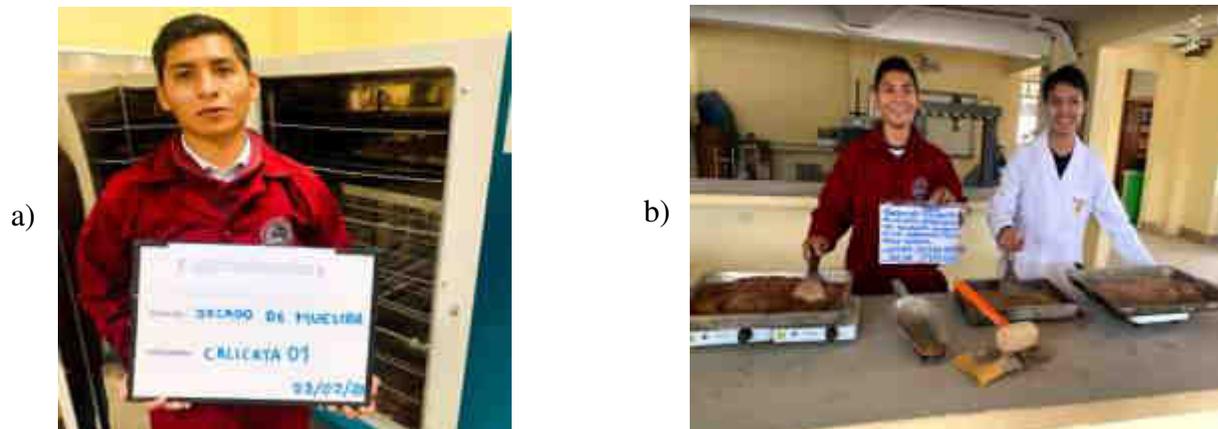


Figura 22: a) Secado de las muestras, b) Obtención del peso lavado y secado al horno



Figura 23: c) Tamizado del material, d) Proporción de las muestras retenidas en el tamizado



c) Toma de datos

Tabla 19: Datos del ensayo de granulometría- Calicata N° 01

TAMAÑO	gr.	gr.	%	%	%
MALLA	MALLA	PESO	RETENIDO	RETENIDO	QUE
ASTM	ASTM	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA
1 1/2"	38.10	168.30	7.04	7.04	92.96
1"	25.40	86.10	3.60	10.64	89.36
3/4"	19.05	138.00	5.77	16.42	83.58
1/2"	12.70	117.9	4.93	21.35	78.65
3/8"	9.53	56.70	2.37	23.72	76.28
¼"	6.35	79.00	3.31	27.03	72.97
No4	4.76	84.30	3.53	30.56	69.44
No10	2.38	207.30	8.67	39.23	60.80
No16	1.19	137.20	5.74	44.97	55.03
No30	0.59	59.50	2.49	47.46	52.54
No40	0.42	33.80	1.41	48.87	51.10
No 60	0.30	39.50	1.65	50.53	49.47
No100	0.15	51.00	2.13	52.66	47.34
No200	0.07	84.40	3.53	56.19	43.80
<b>FONDO</b>		6.00	0.25	56.44	43.56
<b>W-Wo</b>		1041.0	43.56	100.00	
<b>TOTAL</b>		2390.00	100.00		

Tabla 20: Datos del ensayo de granulometría- Calicata N° 02

TAMAÑO	gr.	gr.	%	%	%
MALLA	MALLA	PESO	RETENIDO	RETENIDO	QUE
ASTM	ASTM	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA
2"	50.60	35.20	1.02	1.02	98.98
1 1/2"	38.10	280.70	8.17	9.19	90.81
1"	25.40	181.70	5.29	14.48	85.52
3/4"	19.05	210.50	6.13	20.61	79.39
1/2"	12.70	191.30	5.57	26.17	73.83
3/8"	9.53	99.20	2.89	29.06	70.94
1/4"	6.35	115.20	3.35	32.41	67.59
No4	4.76	105.30	3.06	35.48	64.52
No10	2.00	274.30	7.98	43.46	56.54
No16	1.19	159.20	4.63	48.09	51.91
No30	0.59	75.30	2.19	50.28	49.72
No40	0.42	39.30	1.14	51.43	48.57
No 50	0.30	48.40	1.41	51.81	48.19
No100	0.15	66.10	1.92	54.76	45.24
No200	0.07	108.20	3.15	57.91	42.09
<b>FONDO</b>		8.20	0.24	58.15	41.85
<b>W-Wo</b>		1438.20	41.85	100.00	
<b>TOTAL</b>		3436.30	100.00		



Tabla 21: Datos del ensayo de granulometría- Calicata N° 04

TAMAÑO		gr.	%	%	%
MALLA	ABERTURA	PESO	RETENIDO	RETENIDO	QUE
ASTM	mm	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA
3/4"	19.050	4.90	0.37	0.37	<b>99.63</b>
1/2"	12.700	14.50	1.08	1.45	<b>98.55</b>
3/8"	9.525	15.20	1.14	2.59	<b>97.41</b>
1/4"	6.350	33.20	2.48	5.07	<b>94.93</b>
No4	4.760	25.60	1.92	6.99	<b>93.01</b>
No10	2.00	42.00	3.14	10.13	<b>89.87</b>
No20	0.84	33.80	2.53	12.66	<b>87.34</b>
No30	0.59	21.20	1.59	14.25	<b>85.75</b>
No40	0.42	12.50	0.94	15.18	<b>84.82</b>
No60	0.250	23.20	1.74	16.92	<b>83.08</b>
No100	0.149	44.50	3.33	20.25	<b>79.75</b>
No200	0.074	69.40	5.19	25.44	<b>74.56</b>
<b>FONDO</b>		14.20	1.06	26.50	<b>73.50</b>
<b>W-W<sub>o</sub></b>		982.40	73.50	100.00	
<b>TOTAL</b>		1336.60	100.00		

### 3.5.1.4. Gravedad específica

#### Referencias normativas

- ASTM D-854, AASHTO T-100, J. E. Bowles (Experimento N° 7)
- MTC E 113: Gravedad específica (picnómetro) de los suelos.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

- Balanza de precisión de 0,1 gr.
- Estufa con temperatura uniforme
- Bomba de vacíos.
- Horno de secado a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.
- Frasco volumétrico de 500 cm<sup>3</sup> de capacidad.
- Cono de absorción y varilla para apisonado metálica.
- Bandeja plana, piseta, embudo, cucharón metálico, brocha, espátula.



### **Muestra**

- Cuartear el material y obtener muestra de 100gr. con aproximación de  $\pm 0.01$ gr.
- Poner a secar la muestra en el horno a  $100^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ . Retirar la muestra del horno y dejar enfriar.
- Pesarse la muestra seca que se va a ensayar de acuerdo al volumen del picnómetro.

### **b) Procedimientos**

- Se muestreó el agregado, mezcló uniformemente y redujo por cuarteo hasta obtener un espécimen de ensayo de mayor a 1,0 Kg.
- Se colocó el agregado fino en un recipiente, cubrió con agua dejando reposar durante 24 horas.
- Posteriormente se procedió a decantar el agua evitando pérdida de finos, extendió el agregado sobre una bandeja y colocó en la estufa a temperatura removiendo frecuentemente para el secado uniforme, hasta que las partículas del agregado no se adhieran marcadamente entre sí.
- Se colocó en el molde cónico y golpeó la superficie suavemente 25 veces con la varilla para apisonado y levantó luego el molde probando hasta que el cono se derrumbe por los costados al quitar el molde, lo que indica que el agregado fino alcanzó una condición de superficie seca.
- Se introdujo en el frasco una muestra de 500 gr de material preparado llenando parcialmente con agua destilada.
- Luego se agitó el frasco para eliminar burbujas manualmente, y mecánicamente con la bomba de vacíos hasta extraer las burbujas de aire.
- Después de haber eliminado el aire, se llenó el frasco hasta la capacidad de 500 cm<sup>3</sup>.
- Se determinó el peso total del frasco, espécimen y agua.
- Finalmente se retiró el agregado fino del frasco sin perder material, se secó el material en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por un periodo de 24 horas y se determinó el peso.

### **Ecuaciones**

El peso específico de la fracción fina se calcula con la siguiente fórmula:



$$G_s = \frac{W_o * K}{(W_o + W2 - W1)}$$

Fuente: ASTM D-854, AASHTO T-100, J.E. Bowles (Experimento N°7)

Dónde:

W1 = peso del frasco (picnómetro)+ peso del suelo+ peso del agua en gr.

W2 = peso del frasco (picnómetro)+ peso del agua en gr.

W0 = peso del suelo seco en gr.

K= Factor de corrección por temperatura del agua de ensayo.

Temperatura (°C)	Densidad (g/mL) <sup>B</sup>	Coficiente Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/mL) <sup>B</sup>	Coficiente Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/mL) <sup>B</sup>	Coficiente Temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/mL) <sup>B</sup>	Coficiente Temperatura (K)
23,0	0,99754	0,99933	24,0	0,99730	0,99909	25,0	0,99705	0,99884	26,0	0,99679	0,99858

El peso específico de la muestra se obtiene como el promedio de los resultados de los 3 ensayos.

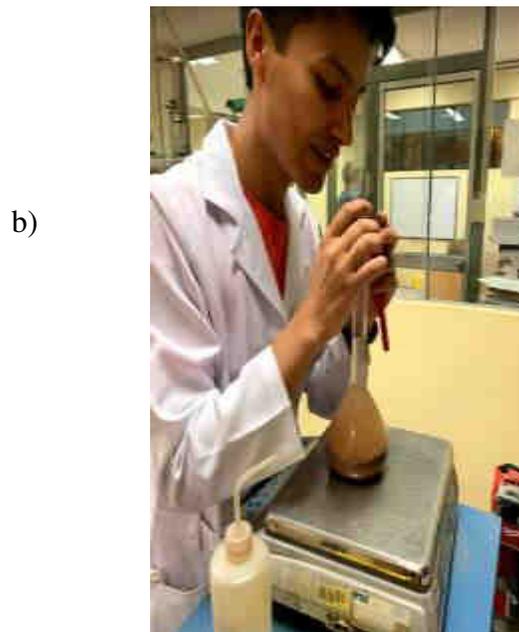
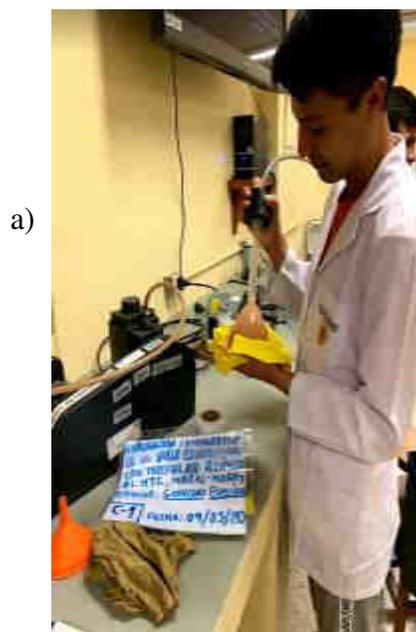


Figura 24: a) Uso de la bomba de vacíos, b) Eliminación de burbujas manualmente



c) Toma de datos

Tabla 22: Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°01

GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	2	3
Capacidad del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	250	250	250
Peso del suelo seco (gr)	80	80	80
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)	393.70	397.30	397.10
Temperatura ( C )	26.00	26.00	26.00
Peso del frasco + peso del agua (gr)	343.10	346.20	346.20
Corrección por temperatura (K)	0.9985	0.9985	0.9985
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.717	2.764	2.745
Gs	2.742 g/cm <sup>3</sup>		

Tabla 23: Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°02

GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	2	3
Capacidad del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	250	250	250
Peso del suelo seco (gr)	80	80	80
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)	394.5	398.10	398.30
Temperatura ( C )	26.00	26.00	26.00
Peso del frasco + peso del agua (gr)	345.12	346.60	347.10
Corrección por temperatura (K)	0.9985	0.9985	0.9985
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.609	2.803	2.774
Gs	2.728 g/cm <sup>3</sup>		

Tabla 24 a): Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°03

GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	2	3
Capacidad del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	250	250	250
Peso del suelo seco (gr)	80	80	80
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)	396.50	396.30	399.40
Temperatura ( C )	20.00	20.00	20.00
Peso del frasco + peso del agua (gr)	345.20	345.10	348.10
Corrección por temperatura (K)	0.9986	0.9986	0.9986
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.784	2.774	2.784
Gs	2.780 g/cm <sup>3</sup>		



Tabla 24 b) : Datos del ensayo de gravedad específica- Calicata N°04

GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	2	3
Capacidad del picnómetro (cm <sup>3</sup> )	250	250	250
Peso del suelo seco (gr)	80	80	80
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)	393.70	397.30	397.10
Temperatura ( C )	26.00	26.00	26.00
Peso del frasco + peso del agua (gr)	343.10	346.20	346.20
Corrección por temperatura (K)	0.9985	0.9985	0.9985
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.716	2.763	2.745
Gs	2.743 g/cm <sup>3</sup>		

### 3.5.1.5. Límite líquido

Límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico.

#### Referencias normativas

MTC 110: determinación del límite líquido de los suelos.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

Recipientes para Almacenaje y mezcla.

Tamiz N°40.

Espátula de hoja flexible.

Aparato del límite líquido (copa de Casagrande) con su acanalador.

Capsulas para obtener el contenido de humedad

Balanza. Una balanza con sensibilidad de 0.1 gr.

Horno de secado.

#### Muestra

Para el límite líquido obtener una muestra seca de 150 a 200 gr. pasante el tamiz No 40.



## b) Procedimientos

Se obtuvo una muestra, alrededor de 200 gr, de material pasante por el tamiz N° 40, se humedeció con agua destilada y se mezcló.

Luego se colocó una porción en la cuchara de Casagrande (previamente calibrada) y se esparció formando una superficie aproximadamente horizontal, para luego dividirla en dos con ayuda del acanalador y levantar y soltar (1 golpe) la cuchara de Casagrande, girando el manubrio del equipo a una velocidad de dos golpes por segundo, hasta que las mitades tengan un contacto de 13 mm. Se tomó una tajada de la muestra, en la zona en la cual se deslizó, la colocamos en un recipiente de peso conocido y pesamos el conjunto para luego determinar su contenido de humedad.

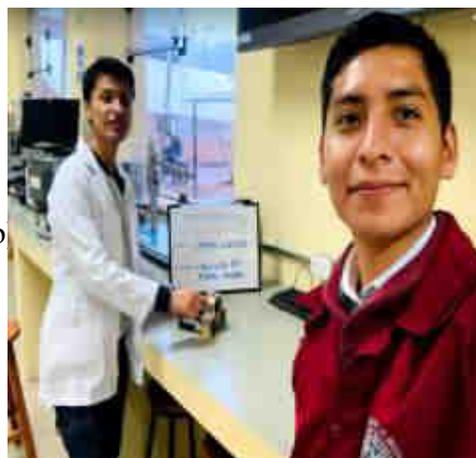
Registramos el número de golpes para el cierre y mezclamos nuevamente toda la muestra añadiendo un poco de agua destilada, para aumentar su contenido de humedad y disminuir el número de golpes necesarios para cerrar la ranura.

Se repitió el proceso, desde el colocado de la muestra, hasta obtener tres pruebas adicionales. Produciendo al final, números de golpes necesarios para el cierre de la ranura que varíen  $7 \pm 1$  golpes, uno respecto al otro, y entre un rango de 10 a 35 golpes.

a)



b) b



*Figura 25a) Superficie horizontal con la cuchara casa grande, b) Registro del número de golpes establecidos*



c) Toma de datos

Tabla 25: Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°1

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0608	0.0572	0.0487	0.0444
Peso del suelo seco + tara	0.0530	0.0495	0.0419	0.0415
Peso de la tara	0.0270	0.0244	0.0202	0.0321
Peso del suelo seco	0.0260	0.0251	0.0217	0.0094
Peso de agua	0.0078	0.0077	0.0068	0.0029
Contenido de humedad %	30.00%	30.70%	31.30%	30.85%
Número de golpes, N	40	31	21	15
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
Límite líquido	30.97%			

Tabla 26: Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°2

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0508	0.0567	0.0475	0.0444
Peso del suelo seco + tara	0.0429	0.0487	0.0417	0.0415
Peso de la tara	0.0164	0.0223	0.0228	0.0321
Peso del suelo seco	0.0265	0.0264	0.0189	0.0029
Peso de agua	0.0079	0.0080	0.0058	0.0029
Contenido de humedad %	29.80%	30.30%	30.70%	30.90%
Número de golpes, N	38	29	28	19
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
Límite líquido	30.40%			



*Tabla 27 a): Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°3*

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-5	M-6	M-7	M-8
Peso del suelo húmedo + tara	0.0631	0.0507	0.0423	0.0572
Peso del suelo seco + tara	0.0556	0.0445	0.0367	0.0506
Peso de la tara	0.0303	0.0250	0.0202	0.0321
Peso del suelo seco	0.0253	0.0195	0.0165	0.0185
Peso de agua	0.0075	0.0062	0.0056	0.0066
Contenido de humedad %	29.64%	31.79%	33.94%	35.68%
Número de golpes, N	36	28	23	18
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
Límite líquido	32.505%			

*Tabla 27 b): Datos del ensayo de límite líquido- calicata N°4*

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0508	0.0567	0.0475	0.0444
Peso del suelo seco + tara	0.0429	0.0487	0.0417	0.0415
Peso de la tara	0.0164	0.0223	0.0228	0.0321
Peso del suelo seco	0.0265	0.0264	0.0189	0.0029
Peso de agua	0.0079	0.0080	0.0058	0.0029
Contenido de humedad %	29.80%	30.30%	30.70%	30.90%
Número de golpes, N	38	29	28	19
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
Límite líquido	30.41%			

### 3.5.1.6. Límite plástico

El límite plástico es el porcentaje de humedad, cuando el suelo está entre el estado plástico y el estado semisólido. El índice plástico se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y plástico, indicando la variación de la plasticidad del suelo. Los límites de Atterberg nos permiten clasificar e identificar los suelos.



### Referencias normativas

- MTC E 111: determinación del límite plástico e índice de plasticidad.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

- Recipientes para almacenaje y mezcla
- Tamiz N°40
- Espátula de hoja flexible
- Aparato del límite líquido (copa de Casagrande) con su acanalador.
- Capsulas para obtener el contenido de humedad
- Balanza. Una balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Horno de secado
- Pipeta con agua
- Placa de vidrio esmerilado de por lo menos 30cm. de lado, de forma cuadrada por 1 cm. de espesor.

#### Muestra

Se obtuvo una muestra, alrededor de 20 gr, de suelo pasante por el tamiz N° 40, se mezcló con agua destilada hasta poder formarse una esfera con la masa, se tomó una porción de 1.5 gr a 2 gr, se moldeó en forma de elipsoide y luego se rodó, el elipsoide, con los dedos para formar un cilindro. Si antes de llegar a un cilindro de 3.2 mm de diámetro no se desmoronaba, se volvía a hacer un elipsoide y se repetía el proceso, hasta que se desmorone a dicho diámetro.

Se repitió el proceso hasta reunir cuatro muestras de 6 gr, cada una. Las cuales, se colocaron en recipientes de pesos conocidos para luego determinar sus contenidos de humedad.

#### b) Procedimientos

El límite plástico es la humedad correspondiente en el cual el suelo se cuarteo y quiebra al formar pequeños rollitos de 3.2 mm de diámetro.

Se trabaja con el material preparado para el límite líquido se toma aproximadamente 20gr.



Se amasa el suelo y se deja que pierda humedad hasta una consistencia a la cuál pueda enrollarse sin que se pegue a las manos esparciéndolo y mezclándolo continuamente sobre la placa de vidrio, la prueba continúa hasta que el rollito empieza a rajarse y tiende a desmoronarse.

Una vez que se ha producido el límite plástico se debe colocar el rollito en un recipiente de peso conocido y se pesa para determinar el contenido de humedad.

### Ecuaciones

El índice de plasticidad del suelo se obtiene de la siguiente diferencia:

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP= índice de plasticidad

LL= limite liquido

LP= limite plástico

a)



b)



*Figura 26: a) Amasado del suelo, b) Mezclado continuo sobre la placa de vidrio*



c) Toma de datos

Tabla 28: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de calicata N°01

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0219	0.0276
Peso del suelo seco + tara	0.0209	0.0266
Peso de la tara	0.0164	0.0223
Peso del suelo seco	0.0045	0.0043
Peso de agua	0.0010	0.0010
Contenido de humedad %	22.20%	23.30%
<b>Límite plástico =</b>	22.74%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	8.20%	

Tabla 29: Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de la calicata N°02

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0325	0.0297
Peso del suelo seco + tara	0.0315	0.0287
Peso de la tara	0.0271	0.0245
Peso del suelo seco	0.0044	0.0042
Peso de agua	0.0010	0.0010
Contenido de humedad %	22.70%	23.80%
<b>Límite plástico =</b>	23.27%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	7.10%	



Tabla 30 a): Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de la calicata N° 03

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0283	0.0382
Peso del suelo seco + tara	0.0275	0.0373
Peso de la tara	0.0228	0.0321
Peso del suelo seco	0.0047	0.0052
Peso de agua	0.0008	0.0009
Contenido de humedad %	17.0%	17.3%
<b>Límite plástico =</b>	17.2%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	15.4%	

Tabla 30 b): Ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de la calicata N°04

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0325	0.0297
Peso del suelo seco + tara	0.0315	0.0287
Peso de la tara	0.0271	0.0245
Peso del suelo seco	0.0044	0.0042
Peso de agua	0.0010	0.0010
Contenido de humedad %	22.70%	23.80%
<b>Límite plástico =</b>	23.27%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	7.10%	

### 3.5.1.7. Proctor modificado

El objetivo de la prueba es determinar el contenido de humedad para el cual el suelo alcanza su máxima densidad seca.

Se tiene que desarrollar un método de ensayo para determinar la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco compactado con una energía de compactación determinada.

Según la gradación de las partículas se aplica uno de los métodos que se detallan en la Tabla 31.



Tabla 31: Método de ensayo proctor modificado

	MÉTODO "A"	MÉTODO "B"	MÉTODO "C"
Molde	4" de diámetro (101,6mm)	4" de diámetro (101,6mm)	6" de diámetro (152,4mm)
Material	Se emplea el que pasa por el tamiz N° 4	Se emplea el que pasa por el tamiz de 3/8"	Se emplea el que pasa por el tamiz de 3/4"
Capas	5	5	5
Golpes por capa	25	25	56
Uso	Cuando el 20% ó menos del peso del material es retenido en el tamiz N°4	Cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz N°4 y 20% ó menos de peso del material es retenido en el tamiz 3/8"	Cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 3/8" y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz 3/4"
Otros usos	Si el método no es especificado, los materiales que cumplen éstos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método B o C.	Si el método no es especificado, y los materiales entran en los requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método C.	El molde de 6 pulgadas de diámetro no será usado con los métodos A o B.

Fuente: Bañon, Bevía

### Referencias normativas

- ASTM D-1557, Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics Of Soil Using Modified Effort (2700 kN-m/m<sup>3</sup>).
- MTC E 115, compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

- Molde de 4 o 6 pulgadas con una altura de 4,584 pulg (116,4 mm) y un volumen de 0,0333 pie<sup>3</sup> (944 cm<sup>3</sup>) y 0,075 pie<sup>3</sup> (2124 cm<sup>3</sup>) respectivamente; un plato base y un collar de extensión de 2".
- Pisón o Martillo, el pisón debe caer libremente a una altura de 18 pulg.
- Balanza, con una aproximación de 1 gramo.
- Horno de Secado, capaz de mantener una temperatura uniforme de 230 ± 9 °F(110±5°C).



- Regla metálica, rígida de una longitud conveniente pero no menor que 10 pulgadas.
- Tamices de  $\frac{3}{4}$ " (19,0 mm),  $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm) y N° 4 (4,75mm).
- Diversas herramientas tales como cucharas, mezclador, pipeta, probetas, fuente para la mezcla completo de muestra de suelo con incrementos de agua.

### **Muestra**

Este ensayo se aplica sólo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de  $\frac{3}{4}$ " (19,0 mm).

Secar el material si este estuviera húmedo, puede ser al aire libre o al horno.

Disgregar por completo los grumos de tal forma de evitar moler las partículas individuales. Pasar el material por el tamiz N°4,  $\frac{3}{8}$ " o  $\frac{3}{4}$ ", según el método a emplearse.

### **b) Procedimientos**

- Se prepara mínimo cuatro (preferiblemente cinco) especímenes con contenidos de agua de modo que éstos tengan un contenido de agua lo más cercano al óptimo estimado.
- Preparar 4 ó 5 muestras de 6kg. para el método C y de 3 Kg. si se emplea el método A o B.
- Determinar y anotar la masa y volumen del molde.
- Colocar la primera capa en el molde y aplicarle 25 ó 56 golpes según el método de ensayo.
- Compactar el espécimen en cinco capas, cada capa deberá tener aproximadamente el mismo espesor, se aplicará los golpes en una relación uniforme de aproximadamente 25 golpes/minuto.
- La última capa debe quedar en el collarín de tal forma que luego pueda en rasarse.
- Determine y registre la masa del espécimen, luego remover el material del molde para extraer una porción de suelo para determinar el contenido de humedad.
- Llevar las muestras al horno para determinar la humedad.
- Repetir el procedimiento para un mínimo de 4 puntos compactados a diferentes contenidos de humedad, dos de los cuales quedan en el lado seco de la curva y los otros dos en el lado húmedo.

### Ecuaciones

Una vez determinados el contenido de humedad de cada muestra hallar la densidad seca de cada punto con la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \omega}$$

Fuente: Braja M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

Dónde:

$\gamma_d$  = densidad seca (gr/cm<sup>3</sup>).

$\gamma_m$  = densidad húmeda (gr/cm<sup>3</sup>).

$\omega$  = contenido de humedad %.

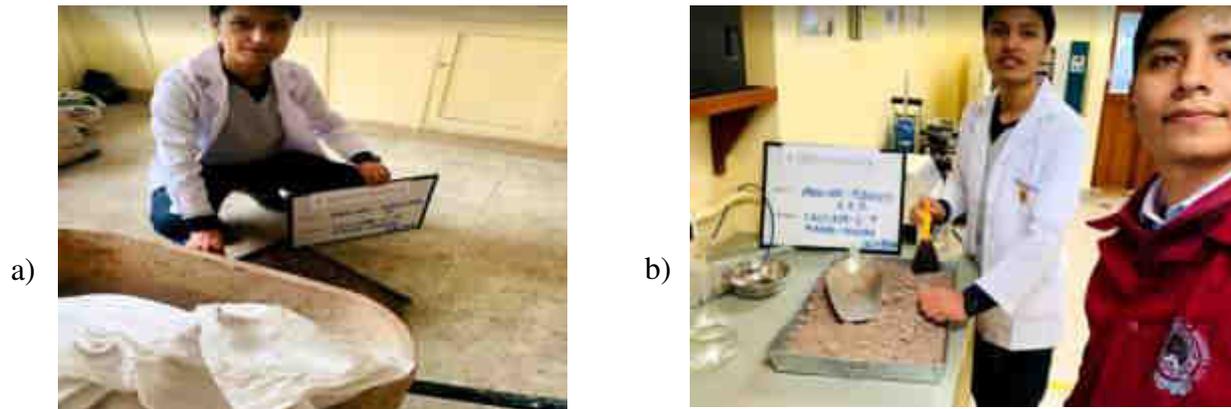


Figura 27: a) Preparado de los especímenes, b) Especímenes con contenido de agua al óptimo estimado

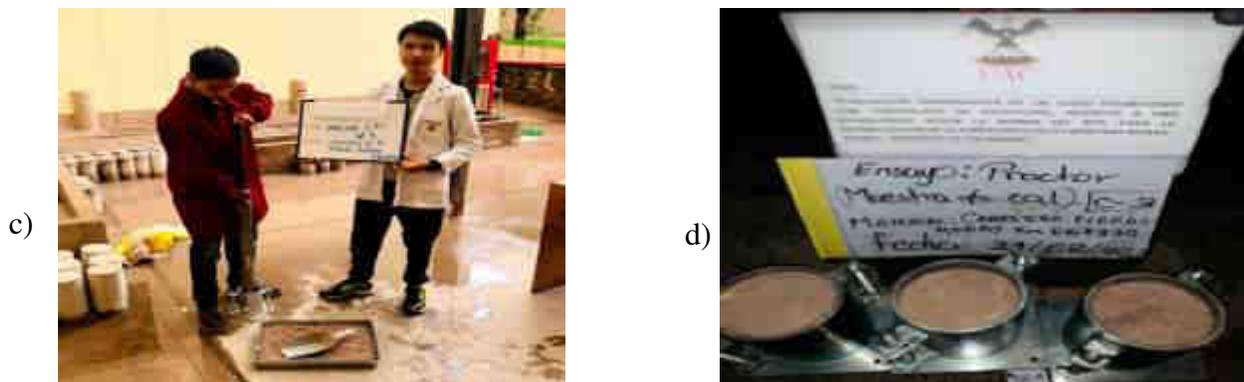


Figura 28: c) Compactado del material por capas, d) Registro de masa del espécimen



c) Toma de datos

Tabla 32: Ensayo de proctor modificado de la calicata N°01

Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del suelo + molde (gr)	6155	6211	6267	6281	6283
Peso del molde (gr)	4254	4254	4254	4254	4254
Peso de la muestra húmeda (gr)	1901	1957	2013	2027	2029
Volumen del molde (cm3)	944	944	944	944	944
Densidad húmeda (gr/cm3)	2.014	2.073	2.132	2.147	2.149
Recipiente N°	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
Peso muestra húmeda + tara (gr)	677	632	416	408	418
Peso muestra seca + tara (gr)	635.3	585.9	379.6	368.9	372.9
Peso del agua (gr)	41.7	46.1	36.4	39.1	45.1
Peso de la tara (gr)	69	68	68	66	62.2
Peso de la muestra seca (gr)	566.3	517.9	311.6	302.9	310.7
Contenido de humedad (%)	7.40%	8.90%	11.70%	12.90%	14.50%
Densidad seca (gr/cm3)	1.876	1.904	1.909	1.902	1.877
DMS (gr/cm3):			1.9095		
CHO (%):			11.50%		

Tabla 33: Ensayo de proctor modificado de la calicata N°03

Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del suelo + molde (gr)	3638	3782	3820	3789	3711
Peso del molde (gr)	1788	1788	1788	1788	1788
Peso de la muestra húmeda (gr)	1850	1994	2032	2001	1923
Volumen del molde (cm3)	944	944	944	944	944
Densidad húmeda (gr/cm3)	1.96	2.112	2.153	2.12	2.037
Recipiente N°	23	46	48	53	61
Peso muestra húmeda + tara (gr)	369.5	209.8	299.1	205.4	285.3
Peso muestra seca + tara (gr)	346.9	197.8	273.7	198.9	257.6
Peso del agua (gr)	22.6	12	25.4	15.5	27.7
Peso de la tara (gr)	57.4	71.4	53.7	67.7	62.2
Peso de la muestra seca (gr)	289.5	126.4	220	122.2	195.4
Contenido de humedad (%)	7.80%	9.50%	11.50%	12.70%	14.20%
Densidad seca (gr/cm3)	1.818	1.929	1.93	1.881	1.784
DMS (gr/cm3):			1.9465		
CHO (%):			10.50%		



### 3.5.1.8. CBR de suelos

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables.

#### Referencias normativas

- ASTM D 1883: Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

- Prensa de compresión, la capacidad de la prensa y su sistema para la medida de carga debe ser de 44.5 kN (10000 lbf) o más y la precisión mínima en la medida debe ser de 44 N (10 lbf) o menos.
- Molde de metal cilíndrico de 152,4mm de diámetro interior y de 177,8 mm de altura, un collar de metal de 50.8 mm de altura y una placa de base perforada.
- Disco espaciador de metal, de forma circular, de 150.8 mm de diámetro exterior y de 61,37 mm de espesor, para insertarlo como falso fondo en el molde cilíndrico durante la compactación.
- Pisón de compactación como el descrito en el modo operativo de ensayo Proctor Modificado.
- Aparato medidor de expansión compuesto por: Una placa de metal perforada, por cada molde, de 149.2 mm de diámetro, estará provista de un vástago en el centro con un sistema de tomillo que permita regular su altura. Un trípode cuyas patas puedan apoyarse en el borde del molde, que lleve montado y bien sujeto en el centro un dial (deformímetro), cuyo vástago coincida con el de la placa, de forma que permita controlar la posición de éste y medir la expansión, con aproximación de 0.025 mm (0.001").
- Uno o dos pesas anulares de metal que tengan una masa total de 4,54 kg y pesas ranuradas de metal cada una con masas de 2,27 kg.
- Pistón de penetración metálico de sección transversal circular, de 49.63 mm de diámetro.
- Dos diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y lecturas en 0.025 mm (0.001 ").
- Tanque para la inmersión de los moldes.
- Horno de secado.



- Misceláneos, Tamices, papel filtro, espátulas, enrasador, pipeta.

### **Muestra**

Se prepara la muestra necesaria. Previamente se debe haber efectuado el ensayo Proctor modificado, se calcula una cantidad suficiente para moldear tres muestras.

### **b) Procedimientos**

- Se toma 5 kg de suelo por cada molde CBR.
- Se determina la humedad óptima y la densidad máxima por medio del ensayo de Proctor.
- Se determina la humedad natural del suelo mediante secado en estufa, según la norma MTC E 108. Conocida la humedad natural del suelo, se le añade la cantidad de agua que le falte para alcanzar la humedad fijada para el ensayo.
- Se pesa el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador y, sobre éste, un disco de papel de filtro grueso del mismo diámetro.
- Una vez preparado el molde, se compacta el espécimen utilizando en cada molde la proporción de agua y la energía necesarias para que el suelo quede con la humedad y densidad deseadas.
- La prueba se efectúa dando 56, 25 y 10 golpes por capa y con contenido de agua correspondiente a la óptima.
- Para suelos cohesivos interesa mostrar su comportamiento sobre un intervalo amplio de humedades. Las curvas se desarrollan para 56, 25 y 10 golpes por capa, con diferentes humedades, con el fin de obtener una familia de curvas que muestran la relación entre el peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.
- Si el espécimen se va a sumergir, se toma una porción de material, entre 100 y 500g (según sea fino o tenga grava) antes de la compactación y otra al final, se mezclan y se determina la humedad del Suelo. Si la muestra no va a ser sumergida, la porción de material para determinar la humedad se toma del centro de la probeta resultante de compactar el suelo en el molde, después del ensayo de penetración. Para ello el espécimen se saca del molde y se rompe por la mitad.



- Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa el espécimen por medio de un enrasador. Se desmonta el molde y se vuelve a montar invertido, sin disco espaciador, colocando un papel filtro entre el molde y la base se pesa.

### **Inmersión:**

- En el molde invertido se coloca la placa perforada con vástago y sobre ésta, los anillos necesarios para completar una sobrecarga. En ningún caso, la sobrecarga total será menor de 4,54 kg (10 lb).
- Se toma la primera lectura para medir el hinchamiento colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde. A continuación, se sumerge el molde en el tanque con la sobrecarga colocada dejando libre acceso al agua por la parte inferior y superior de la muestra. Se mantiene la probeta en estas condiciones durante 48 horas (2 días).
- Al final del período de inmersión, se vuelve a leer el deformímetro para medir el hinchamiento.
- Después del periodo de inmersión se saca el molde del tanque y se vierte el agua retenida en la parte superior del mismo, sosteniendo firmemente la placa y sobrecarga en su posición. Se deja escurrir el molde durante 15 minutos en su posición normal y a continuación se retira la sobrecarga y la placa perforada. Inmediatamente se pesa.

### **Penetración**

- Se aplica una sobrecarga que sea suficiente, para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento (con  $\pm 2.27$  kg de aproximación) pero no menor de 4.54 kg (10 lb).
- Se monta el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón y se aplica una carga de 50N (5 kg) para que el pistón asiente.
- Seguidamente se sitúan en cero las agujas de los diales medidores, el del anillo dinamométrico, u otro dispositivo para medir la carga, y el de control de la penetración.
- Se aplica la carga sobre el pistón de penetración con una velocidad de penetración uniforme de 1.27 mm (0.05") por minuto (con la ayuda de un deformímetro de penetración y un cronómetro). Se anotan las lecturas de la carga para las siguientes penetraciones:



Tabla 34: Penetraciones a considerar en el ensayo

Penetración	
Milímetros	Pulgadas
0.63	0.025
1.27	0.050
1.90	0.075
2.54	0.100
3.17	0.125
3.81	0.150
5.08	0.200
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Fuente: MTC E132

Estas lecturas se hacen si se desea definir la forma de la curva, pero no son indispensables. Finalmente, se desmonta el molde y se toma de su parte superior, en la zona próxima a donde se hizo la penetración, una muestra para determinar su humedad.

### Agua absorbida

El cálculo para el agua absorbida puede efectuarse de dos maneras. Una, a partir de los datos de las humedades antes de la inmersión y después de ésta; la diferencia entre ambas se toma normalmente como tanto por ciento de agua absorbida. Otra, utilizando la humedad de la muestra total contenida en el molde. Se calcula a partir del peso seco de la muestra (calculado) y el peso húmedo antes y después de la inmersión.

Ambos resultados coincidirán o no, según que la naturaleza del suelo permita la absorción uniforme del agua (suelos granulares), o no (suelos plásticos). En este segundo caso debe calcularse el agua absorbida por los dos procedimientos.

### Expansión

La expansión se calcula por la diferencia entre las lecturas del deformímetro antes y después de la inmersión.

Este valor se refiere en tanto por ciento con respecto a la altura de la muestra en el molde, que es de 127 mm (5").



### Cálculo del índice CBR

Valor de la relación de soporte (índice resistente CBR). Se llama valor de la relación de soporte (índice CBR), al tanto por ciento de la presión ejercida por el pistón sobre el suelo, para una penetración determinada, en relación con la presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón. Las características de la muestra patrón se muestran en la tabla 50:

Tabla 35: Presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón

Penetración		Presión		
Milímetros	Pulgadas	MN/m <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/plg <sup>2</sup>
2.54	0.1	6.9	70.31	1
5.08	0.2	10.35	105.46	1.5

Fuente: MTC E132

### Ecuaciones

La expansión se calcula con la siguiente expresión:

$$\%Expansión = \frac{L2 - L1}{127} \times 100$$

Fuente: MTC E-132

Dónde:

L 1 =Lectura inicial en mm.

L2 = Lectura final en mm.



Figura 29: a) Compactado del espécimen del molde, b) Inmersión del molde en el tanque de agua

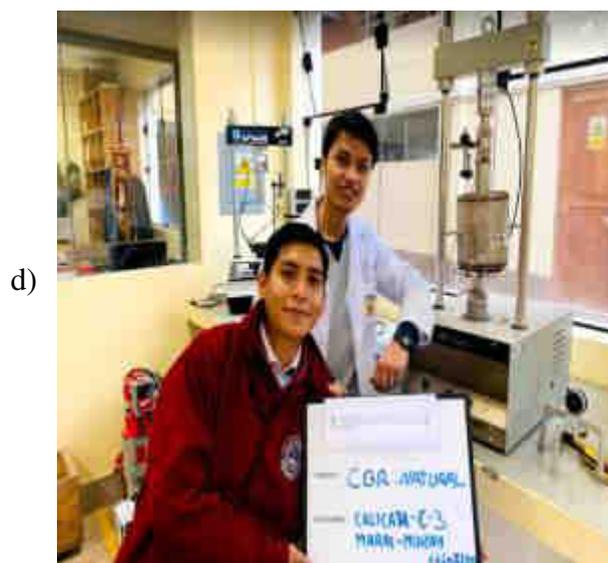


Figura 30: c) Lectura para medir el hinchamiento colocando el trípode, d) Medición del dial para medir la penetración del pistón

c) Toma de datos

Tabla 36: Características de los especímenes de ensayo- CBR estado natural- Calicata N°1

Descripción	Espéc. N°1	Espéc. N°2	Espéc. N°3	Espéc. N°4	Espéc. N°5	Espéc. N°6	Espéc. N°7	Espéc. N°8	Espéc. N°9
E. compact(kg/cm <sup>3</sup> )	27.31	27.31	27.3	27.3	27.31	12.19	4.876	4.876	4.876
Densidad seca	0.165	0.64	0.166	0.164	0.166	0.15	0.156	0.151	0.149
Humedad de penetración	1192.2	1203.3	1183.9	1150.7	1175.8	1121.8	1138.5	1184.5	1204.8
Humedad de compactación	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Absorción	3.37	3.50	3.37	3.50	3.39	5.93	8.71	8.70	8.68
Expansión	2.62	2.42	2.62	2.42	2.62	3.42	4.21	4.08	4.28
Tiempo de embebido	2	2	2	2	2	2	2	2	2



Tabla 37: Resumen de los resultados en ensayo- CBR estado natural- Calicata N°1

Molde N°	105	115	125	105	115	125	105	115	125
Golpes por capa N°	56	56	56	25	25	25	12	12	12
Condición de la muestra	SATU RAD O								
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	8505	9538	9524	8266	9310	9272	8069	9129	9125
Peso de molde (g)	3955	4993	4982	3955	4993	4982	3955	4993	4982
Peso del suelo húmedo (G)	4550	4545	4542	4311	4317	4290	4114	4136	4143
Volumen del molde (cm3)	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128
Densidad húmeda (g/cm3)	2.14	2.14	2.13	2.03	2.03	2.02	1.93	2.03	1.95
Tara N°	23	5	41	48	4	46	32	48	56
Peso suelo húmedo + tara (g)	0.459	0.421	0.316	0.342	0.428	0.312	0.564	0.422	0.323
Peso suelo seco + tara (g)	0.416	0.383	0.289	0.312	0.390	0.288	0.512	0.384	0.296
Peso de tara (g)	0.057	0.067	0.058	0.054	0.066	0.071	0.057	0.063	0.069
Peso de agua (g)	0.043	0.038	0.027	0.030	0.038	0.024	0.052	0.038	0.027
Peso del suelo seco (g)	0.359	0.316	0.231	0.258	0.323	0.217	0.455	0.321	0.227
Contenido de humedad %	11.92 %	12.03 %	11.84 %	11.51 %	11.76 %	11.22 %	11.39 %	11.85 %	12.05 %
Densidad seca (g/cm3)	0.165	0.164	0.166	0.162	0.159	0.165	0.156	0.151	0.149



Tabla 38: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°1- Ensayo 1

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Área					
Lectura	Penetración	Tiempo		56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
				Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	2.50	2.01	1.00	1.66	1.00	1.66
2	0.05	1.27	1	7.50	3.15	3.00	2.12	2.00	1.89
3	0.075	1.905	1.5	11.00	3.95	7.00	3.04	3.50	2.24
4	0.1	2.54	2	15.50	5.00	11.50	4.08	5.50	2.70
5	0.15	3.81	3	23.00	6.73	21.00	6.21	10.00	3.73
6	0.2	5.08	4	36.00	9.74	30.00	8.35	13.50	4.54
7	0.25	6.35	5	44.00	11.59	38.00	10.20	17.00	5.35
8	0.3	7.62	6	52.00	13.45	46.50	12.17	20.00	6.04
9	0.4	10.36	8	70.00	17.63	50.50	15.42	23.00	6.73
10	0.5	12.7	10	81.00	20.19	73.00	18.33	26.00	7.43

Tabla 39: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°1- Ensayo 2

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area					
Lectura	Penetracion	Tiempo		56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
				Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	3.00	2.12	2.00	1.89	1.00	1.66
2	0.05	1.27	1	8.00	3.27	4.50	2.47	2.50	2.01
3	0.075	1.905	1.5	12.00	4.20	8.00	3.27	4.50	2.47
4	0.1	2.54	2	16.00	5.12	12.00	4.20	6.00	2.81
5	0.15	3.81	3	27.00	7.66	23.00	6.73	10.00	3.73
6	0.2	5.08	4	37.00	9.97	32.00	8.81	13.00	4.43
7	0.25	6.35	5	46.00	12.06	40.00	10.67	16.00	5.12
8	0.3	7.62	6	56.00	14.38	48.00	12.52	18.00	5.58
9	0.4	10.36	8	74.00	18.56	61.00	15.54	22.00	6.50
10	0.5	12.7	10	88.00	21.83	72.00	18.10	24.00	7.32



Tabla 40: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°1- Ensayo 3

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area					
Lectura	Penetracion	Tiempo		56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
				Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	2.00	1.89	2.00	1.89	1.00	1.66
2	0.05	1.27	1	7.00	3.04	4.00	2.35	3.00	2.12
3	0.075	1.905	1.5	10.00	3.73	7.00	3.04	4.50	2.47
4	0.1	2.54	2	13.00	4.43	11.00	3.96	8.00	2.81
5	0.15	3.81	3	21.00	6.27	21.00	6.27	11.00	3.96
6	0.2	5.08	4	32.00	8.81	31.00	8.58	15.00	4.89
7	0.25	6.35	5	41.00	10.90	37.00	9.97	20.00	5.04
8	0.3	7.62	6	49.00	12.75	43.00	11.36	24.00	6.97
9	0.4	10.36	8	65.00	16.47	52.00	13.45	31.00	8.58
10	0.5	12.7	10	76.00	19.08	60.50	15.42	36.00	9.74

Tabla 41: Características de los especímenes de ensayo- CBR estado natural- Calicata N°3

Descripcion	Especi men N°1	Especi men N°2	Especi men N°3	Especi men N°4	Especi men N°5	Especi men N°6	Especi men N°7	Especi men N°8	Especi men N°9
E. compact(kg/ cm3)	27.31	27.31	27.3	27.3	27.31	12.19	4.876	4.876	4.876
Densidad seca	1.93	1.94	1.93	1.82	1.82	1.81	1.760	1.77	1.77
Humedad de penetracion	11.13	10.19	10.55	10.79	10.52	10.71	10.45	10.94	10.63
Humedad de compactacio n	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
Absorcion	4.05	4.44	4.4	4.01	4.54	4.500	4.920	4.9	4.9
Expansion	3.24	3.18	3.2	4.4	4.54	4.5	4.92	4.9	4.9
Tiempo de embebido	2	2	2	2	2	2	2	2	2



Tabla 42: Resumen de los resultados en ensayo- CBR estado natural- Calicata N°3

Molde N°	105	115	125	105	115	125	105	115	125
Golpes por capa N°	56	56	56	25	25	25	10	10	10
Condición de la muestra	SATU RAD O								
Peso de molde + Suelo humedo (g)	8515	9538	9524	8.266	9310	9272	8069	9129	9125
Peso de molde (g)	3955	4993	4982	3955	4993	4982	3955	4993	4982
Peso del suelo humedo (G)	4560	4545	4542	4311	4317	4290	4114	4136	4143
Volumen del molde (cm3)	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128	2128
Densidad humeda (g/cm3)	2.14	2.14	2.13	2.03	2.03	2.02	1.93	1.94	1.95
Tara N°	4	5	41	48	4	46	32	9	56
Peso suelo humedo + tara (g)	0.459	0.421	0.316	0.342	0.428	0.312	0.564	0.422	0.323
Peso suelo seco + tara (g)	0.416	0.383	0.289	0.312	0.39	0.288	0.512	0.384	0.296
Peso de tara (g)	0.057	0.067	0.058	0.054	0.066	0.071	0.057	0.063	0.069
Peso de agua (g)	0.043	0.038	0.027	0.03	0.038	0.024	0.052	0.038	0.027
Peso del suelo seco (g)	0.359	0.316	0.231	0.258	0.323	0.217	0.455	0.321	0.227
Contenido de humedad %	11.13 %	10.19 %	10.55 %	10.79 %	10.52 %	10.70 %	10.45 %	10.94 %	10.63 %
Densidad seca (g/cm3)	1.928	1.937	1.932	1.823	1.82	1.819	1.764	1.766	1.765



Tabla 43: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°3- Ensayo 1

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area					
Lectura	Penetracion		Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
	Pug	mm		Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.05	1.27	1	3.00	2.12	2.00	1.89	1.50	1.78
3	0.075	1.905	1.5	5.50	2.70	5.00	2.58	3.50	2.24
4	0.1	2.54	2	7.50	3.16	6.50	2.93	5.00	2.58
5	0.15	3.81	3	9.10	3.53	7.50	3.16	5.50	2.70
6	0.2	5.08	4	11.00	3.96	9.50	3.62	7.00	3.04
7	0.25	6.35	5	13.00	4.43	11.00	3.96	8.50	3.39
8	0.3	7.62	6	15.00	4.89	13.00	4.43	10.00	3.73
9	0.4	10.36	8	17.00	5.35	14.50	4.77	11.00	3.96
10	0.5	12.7	10	20.00	6.04	18.00	5.58	13.50	4.54

Tabla 44: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°3- Ensayo 2

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Área					
Lectura	Penetración		Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
	Pug	mm		Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.05	1.27	1	2.75	2.06	2.25	1.96	1.75	1.83
3	0.075	1.905	1.5	5.50	2.70	5.00	2.58	3.75	2.29
4	0.1	2.54	2	7.25	3.10	6.50	2.93	5.00	2.58
5	0.15	3.81	3	8.75	3.45	7.75	3.22	5.50	2.70
6	0.2	5.08	4	11.00	3.96	9.25	3.56	7.25	3.10
7	0.25	6.35	5	13.25	4.48	11.00	3.96	8.75	3.45
8	0.3	7.62	6	14.75	4.83	12.75	4.37	10.00	3.73
9	0.4	10.36	8	16.50	5.23	14.25	4.71	11.00	3.96
10	0.5	12.7	10	19.75	5.98	17.50	5.45	13.25	4.02



Tabla 45: Etapa de penetración- CBR estado natural- Calicata N°3- Ensayo 3

F.Anillo		Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Área							
Lectura	Penetración	Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES		
			Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.05	1.27	1	2.80	2.08	2.00	1.89	1.40	1.75
3	0.075	1.905	1.5	5.20	2.63	5.25	2.64	3.40	2.21
4	0.1	2.54	2	7.00	3.04	6.80	3.00	4.80	2.54
5	0.15	3.81	3	8.60	3.41	7.80	3.23	5.50	2.70
6	0.2	5.08	4	10.50	3.85	10.00	3.73	6.60	2.95
7	0.25	6.35	5	12.50	4.31	11.50	4.08	8.00	3.27
8	0.3	7.62	6	14.20	4.70	13.50	4.54	9.40	3.60
9	0.4	10.36	8	16.20	5.16	15.50	5.00	10.50	3.85
10	0.5	12.7	10	19.00	5.81	19.00	5.81	13.00	4.43

### 3.5.2. Selección del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno.

#### 3.5.2.1. Dosificación y uso adecuado del tereftalato de polietileno

Debido a la baja calidad del material de la carretera Maras- Moray, se tuvo que reemplazar con otro elemento más resistente, para lo cual se adicionó tereftalato de polietileno en diferentes dimensiones y porcentajes con el único objetivo de encontrar una dosificación óptima cuantificada en valor de soporte (CBR).

#### Determinación de la forma geométrica óptima del polímero:

Una vez obtenido los polímeros reciclados de diferentes dimensiones, se evaluó las dimensiones y formas geométricas adecuados con el objetivo de conseguir la dosificación optima suelo - polímero para luego cuantificarlo en función al índice del CBR, para el cual se clasificaron los polímeros según sus dimensiones tamizando por las mallas estándares de un análisis granulométrico, y es así que se hicieron varios ensayos con diferentes dimensiones de los polímeros, se realizaron polímeros de formas rectangulares casi cuadradas, así mismo polímeros rectangulares y polímeros en forma de peine.



*Figura 31: Formas geométricas del Tereftalato de polietileno*

Se realizaron los correspondientes ensayos asumiendo una dosificación del 1% de tereftalato de polietileno con respecto al peso seco del suelo, se utilizó un polímero pasante en  $\frac{3}{4}$ " y retenido en  $\frac{1}{2}$ ", un polímero pasante en  $\frac{1}{2}$ " y retenido en  $\frac{3}{8}$ ", un polímero pasante en  $\frac{3}{8}$ " y retenido en  $\frac{1}{4}$ ", un polímero pasante en  $\frac{1}{4}$ " y retenido en N°04, un polímero pasante en N°04 y retenido en N°08, y finalmente de otra forma geométrica.

#### **a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba**

- Prensa de compresión, la capacidad de la prensa y su sistema para la medida de carga debe ser de 44.5 kN (10000 lbf) o más y la precisión mínima en la medida debe ser de 44 N (10 lbf) o menos.
- Molde de metal cilíndrico de 152,4mm de diámetro interior y de 177,8 mm de altura, un collar de metal de 50.8 mm de altura y una placa de base perforada.
- Disco espaciador de metal, de forma circular, de 150.8 mm de diámetro exterior y de 61,37 mm de espesor, para insertarlo como falso fondo en el molde cilíndrico durante la compactación.
- Pisón de compactación como el descrito en el modo operativo de ensayo Proctor Modificado.
- Aparato medidor de expansión compuesto por: Una placa de metal perforada, por cada molde, de 149.2 mm de diámetro, estará provista de un vástago en el centro con un sistema de tomillo que permita regular su altura. Un trípode cuyas patas puedan apoyarse en el borde del molde, que lleve montado y bien sujeto en el centro un dial (deformímetro), cuyo



vástago coincida con el de la placa, de forma que permita controlar la posición de éste y medir la expansión, con aproximación de 0.025 mm (0.001").

- Uno o dos pesas anulares de metal que tengan una masa total de 4,54 kg y pesas ranuradas de metal cada una con masas de 2,27 kg.
- Pistón de penetración metálico de sección transversal circular, de 49.63 mm de diámetro.
- Dos diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y lecturas en 0.025 mm (0.001 ").
- Tanque para la inmersión de los moldes.
- Horno de secado
- Misceláneos, Tamices, papel filtro, espátulas, enrasador, pipeta.
- 02 kg de tereftalato de polietileno

### **CBR con tereftalato de polietileno**

Una vez obtenido los polímeros reciclados de diferentes dimensiones, se evaluó la forma geométrica adecuada con el único objetivo de conseguir la dosificación óptima para el suelo, y así mismo cuantificarlo en función al índice del CBR.

Para tal finalidad se clasificaron los polímeros según sus dimensiones tamizando por las mallas de análisis granulométrico, como lo mencionado anteriormente, de esa manera se hicieron varios ensayos con diferentes dimensiones de los polímeros.

#### **b) Procedimiento**

- Se toma 5 kg de suelo por cada molde CBR.
- Se tomará como humedad óptima y densidad máxima los datos obtenidos de la muestra en estado natural del ensayo Proctor.
- Se pesa el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador y, sobre éste, un disco de papel de filtro grueso del mismo diámetro.
- Se realizan los correspondientes tamizados del tereftalato de polietileno asumiendo una dosificación del 1% con respecto al peso seco del suelo, se utilizó un polímero pasante en  $\frac{3}{4}$ " y retenido en  $\frac{1}{2}$ ", un polímero pasante en  $\frac{1}{2}$ " y retenido en  $\frac{3}{8}$ ", un polímero pasante en  $\frac{3}{8}$ " y retenido en  $\frac{1}{4}$ ", un polímero pasante en  $\frac{1}{4}$ " y retenido en N°04, un polímero pasante en N°04 y retenido en N°08, y finalmente de otra forma geométrica.



- Una vez preparado el molde, se compacta el espécimen utilizando en cada molde la proporción de agua y la energía necesarias para que el suelo quede con la humedad y densidad deseadas.
- La prueba se efectúa dando 56, 25 y 10 golpes por capa y con contenido de agua correspondiente a la óptima.
- Para suelos cohesivos interesa mostrar su comportamiento sobre un intervalo amplio de humedades. Las curvas se desarrollan para 56, 25 y 10 golpes por capa, con diferentes humedades, con el fin de obtener una familia de curvas que muestran la relación entre el peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.
- Si el espécimen se va a sumergir, se toma una porción de material, entre 100 y 500g (según sea fino o tenga grava) antes de la compactación y otra al final, se mezclan y se determina la humedad del Suelo. Si la muestra no va a ser sumergida, la porción de material para determinar la humedad se toma del centro de la probeta resultante de compactar el suelo en el molde, después del ensayo de penetración. Para ello el espécimen se saca del molde y se rompe por la mitad.
- Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa el espécimen por medio de un enrasador. Se desmonta el molde y se vuelve a montar invertido, sin disco espaciador, colocando un papel filtro entre el molde y la base se pesa.

### **Inmersión**

- En el molde invertido se coloca la placa perforada con vástago y sobre ésta, los anillos necesarios para completar una sobrecarga. En ningún caso, la sobrecarga total será menor de 4,54 kg (10 lb).
- Se toma la primera lectura para medir el hinchamiento colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde. A continuación, se sumerge el molde en el tanque con la sobrecarga colocada dejando libre acceso al agua por la parte inferior y superior de la muestra. Se mantiene la probeta en estas condiciones durante 48 horas (2 días).
- Al final del período de inmersión, se vuelve a leer el deformímetro para medir el hinchamiento.
- Después del periodo de inmersión se saca el molde del tanque y se vierte el agua retenida en la parte superior del mismo, sosteniendo firmemente la placa y sobrecarga en su



posición. Se deja escurrir el molde durante 15 minutos en su posición normal y a continuación se retira la sobrecarga y la placa perforada. Inmediatamente se pesa.

### Penetración

- Se aplica una sobrecarga que sea suficiente, para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento (con  $\pm 2.27$  kg de aproximación) pero no menor de 4.54 kg (10 lb).
- Se monta el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón y se aplica una carga de 50N (5 kg) para que el pistón asiente.
- Seguidamente se sitúan en cero las agujas de los diales medidores, el del anillo dinamométrico, u otro dispositivo para medir la carga, y el de control de la penetración.
- Se aplica la carga sobre el pistón de penetración con una velocidad de penetración uniforme de 1.27 mm (0.05") por minuto (con la ayuda de un deformímetro de penetración y un cronómetro).

### Agua absorbida

- El cálculo para el agua absorbida puede efectuarse de dos maneras. Una, a partir de los datos de las humedades antes de la inmersión y después de ésta; la diferencia entre ambas se toma normalmente como tanto por ciento de agua absorbida.

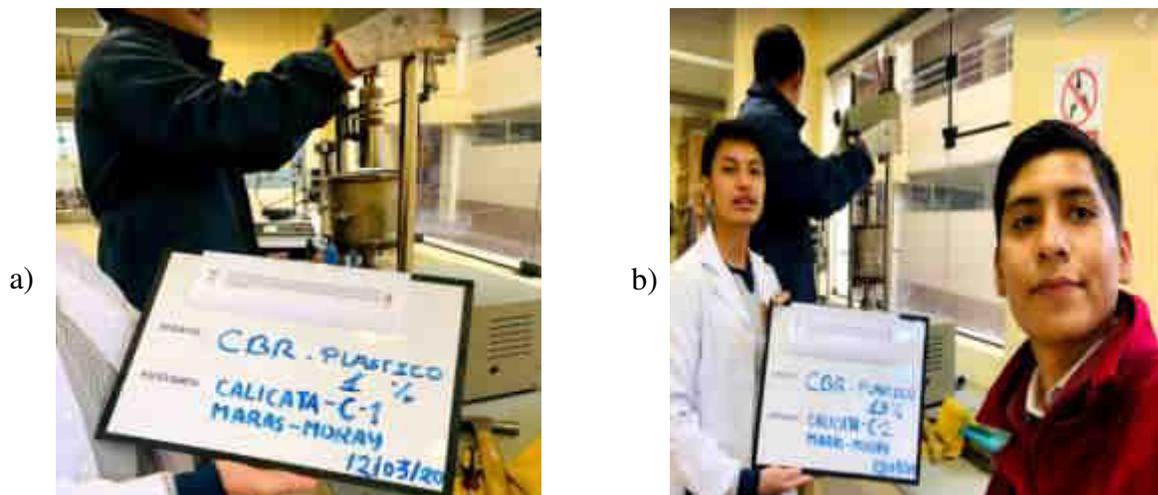


Figura 32: a) Ensayo CBR pasante  $\frac{3}{4}$ " y retenido  $\frac{1}{2}$ " b) Ensayo CBR pasante  $\frac{3}{8}$ " y retenido  $\frac{1}{4}$ ".

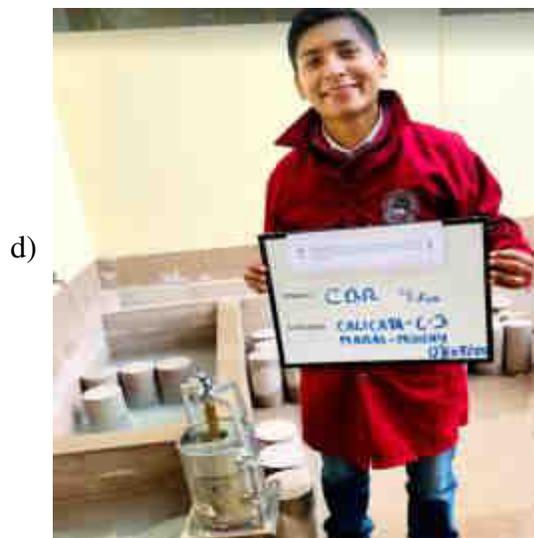
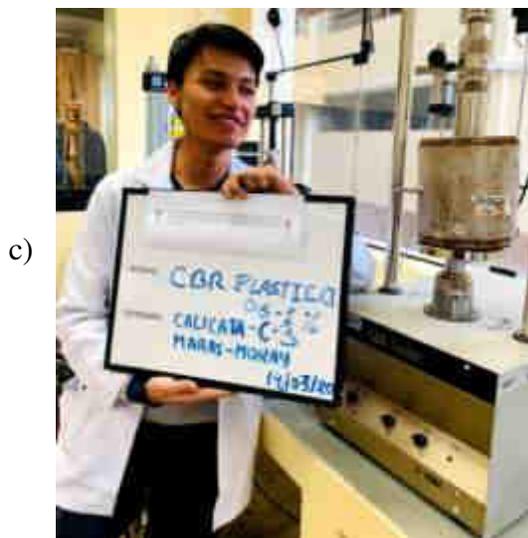


Figura 33: Ensayo CBR pasante  $\frac{1}{4}$ " y retenido N°04 "c)", Ensayo CBR pasante N°04 y retenido N°08 "d)"

Una vez realizado los ensayos de CBR, se obtienen valores óptimos en función del CBR comprendidos en la dimensión del tereftalato de polietileno, el cual promedia un rango de  $\frac{3}{4}$ " pasante y retenido en N°08, de los cuales se escogerá cuál de los ensayos representa mayor porcentaje de CBR, y de esa manera se obtendrá cuál de las dimensiones será la óptima.

### c) Toma de datos

Tabla 46: Características de los especímenes de ensayo- CBR con polímero pasante  $\frac{3}{8}$ " y retenido  $\frac{1}{4}$ "

Descripción		Especímen N°1	Especímen N°2	Especímen N°3
Energía de compactación	kg-cm/cm <sup>3</sup>	4.88	12.19	27.31
Densidad seca	g/cm <sup>3</sup>	1.866	1.767	1.697
Humedad de penetración	%	11.40	12.65	11.52
Humedad de compactación	%	11.5	11.5	11.5
Absorción	%	3.399	5.107	8.777
Expansión	%	1.18	1.62	2.06
Tiempo de embebido	días	2	2	2



Tabla 47: Resumen de los resultados en ensayo- CBR con polímero pasante 3/8" y retenido 1/4"

Molde N°	105	115	125
Golpes por capa N°	56	25	10
Condición de la muestra	SATURADO	SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	8380	9191	9010
Peso de molde (g)	3955	4993	4982
Peso del suelo húmedo (G)	4425	4198	4028
Volumen del molde (cm3)	2128	2128	2128
Densidad húmeda (g/cm3)	2.06	1.95	1.87
Tara N°	12	25	24
Peso suelo húmedo + tara (g)	0.3785	0.4627	0.3883
Peso suelo seco + tara (g)	0.3456	0.4213	0.3542
Peso de tara (g)	0.057	0.066	0.0583
Peso de agua (g)	0.033	0.041	0.034
Peso del suelo seco (g)	0.2886	0.3553	0.2959
Contenido de humedad %	11.40%	11.65%	11.52%
Densidad seca (g/cm3)	1.866	1.767	1.697

Tabla 48: Etapa de absorción- CBR con polímero pasante 3/8" y retenido 1/4"

Peso suelo embebido + molde	Kg	9.455	9.340	9.225
Peso de molde	Kg	4.895	4.950	4.880
Peso suelo húmedo embebido	Kg	4.560	4.390	4.345
Peso suelo húmedo sin embeber	Kg	4.425	4.198	4.028
Peso del agua embebida	Kg	0.135	0.192	0.317
Peso del suelo seco	Kg	3.972	3.760	3.612
Absorción	%	3.399	5.107	8.777



Tabla 49: Etapa de expansión- CBR con polímero pasante 3/8" y retenido 1/4"

Tiempo	N°105			N°115			N°125		
	Dial	Expansion mm	Expansion %	Dial	Expansion mm	Expansion %	Dial	Expansion mm	Expansion %
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 día	48	1.219	0.960	78	1.981	1.56	97	2.464	1.940
2 días	59	1.499	1.18	81	2.057	1.62	103	2.616	2.060

Tabla 50: Etapa de penetración- CBR con polímero pasante 3/8" y retenido 1/4"

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area					
Lectura	Penetracion	Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES		
			Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	3	2.12	1.5	1.78	1	1.66
2	0.05	1.27	1	9	3.50	5.25	2.64	3.5	2.24
3	0.075	1.905	1.5	13.25	4.48	9	3.50	5.25	2.64
4	0.1	2.54	2	17.25	5.41	15.25	4.94	7.85	3.24
5	0.15	3.81	3	27.25	7.72	26.25	7.49	13.75	4.60
6	0.2	5.08	4	43	11.36	37.75	10.15	20	6.04
7	0.25	6.35	5	52.5	13.57	47.75	12.46	28.5	8.01
8	0.3	7.62	6	62	15.77	58	14.84	36.75	9.91
9	0.4	10.16	8	83	20.66	76	19.03	52.5	13.57
10	0.5	12.7	10	95.5	23.58	91.25	22.59	68.25	17.22



### Determinación del porcentaje óptimo del polímero

Una vez determinado el material de polímero óptimo a utilizar se tuvo que determinar el porcentaje de tereftalato de polietileno con el objetivo de obtener una máxima capacidad de soporte expresada en términos de CBR, para lo cual se tomaran valores del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% respecto al peso seco del suelo.



*Figura 34:a) Dosificación del tereftalato al 0.5% y 1% “b)”, Dosificación del tereftalato al 1.5% y 2% ”*

Con el porcentaje de tereftalato de polietileno con el objetivo de obtener una máxima capacidad de soporte expresada en términos de CBR, para lo cual se tomaran valores del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% respecto al peso seco del suelo.

Una vez realizado los ensayos de CBR, se obtienen valores óptimos en función del CBR comprendidos en la dimensión del tereftalato de polietileno, el cual promedia un rango de  $\frac{3}{4}$ ” pasante y retenido en N°08, de los cuales se escogerá cuál de los ensayos representa mayor porcentaje de CBR, y de esa manera se obtendrá cuál de las dimensiones será la óptima.



Tabla 51: Resultados de CBR al 95% DMS con diferentes % de tereftalato de polietileno- Tramo 1

N°	Golpes		Ensayo N°1			Ensayo N°2			Ensayo N°3			Ensayo N°4		
			0.5% del PSS			1.0% del PSS			1.5% del PSS			2.0% del PSS		
			56	25	10	56	25	10	56	25	10	56	25	10
P.E Seco	g/c m3		1.89	1.78	1.72	1.87	1.77	1.70	1.85	1.75	1.68	1.83	1.73	1.66
Expansión	%		1.24	1.70	2.06	1.22	1.68	2.14	1.1	1.58	1.96	1	1.48	1.82
Absorción	%		2.84	3.43	6.71	2.34	3.64	5.96	2.52	3.30	6.27	2.39	3.48	6.45
Esfuerzo de penetración	0.1"	Kg/cm <sup>2</sup>	4.94	4.48	2.99	5.35	4.83	3.22	5.52	5.00	3.27	5.29	4.77	3.16
	0.2"		9.91	8.81	5.23	10.84	9.68	5.75	11.25	10.03	5.93	10.67	9.51	5.64
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/cm <sup>2</sup>	4.94	4.48	2.99	5.35	4.83	3.22	5.52	5.00	3.27	5.29	4.77	3.16
	0.2"		9.91	8.81	5.23	10.84	9.68	5.75	11.25	10.03	5.93	10.67	9.51	5.64
Valor de CBR	0.1"	%	7.02%	6.36%	4.24%	7.59%	6.85%	4.56%	7.84%	7.10%	4.65%	7.51%	6.77%	4.48%
	0.2"		9.38%	8.34%	4.95%	10.26%	9.16%	5.44%	10.64%	9.49%	5.61%	10.09%	9.00%	5.33%

Tabla 52: Etapa de penetración- CBR con polímero al 0.5%- Tramo 1

F.Anillo		Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )= Carga/Area							
Lectura	Penetración	Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES		
			Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm <sup>2</sup>	Dial	kg/cm <sup>2</sup>	Dial	kg/cm <sup>2</sup>
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	2.25	1.95	1.25	1.72	1.50	1.78
2	0.05	1.27	1	7.50	3.16	4.00	2.35	3.50	2.24
3	0.075	1.905	1.5	11.00	3.96	7.50	3.16	4.25	2.41
4	0.1	2.54	2	15.25	4.94	13.25	4.48	6.75	2.99
5	0.15	3.81	3	24.75	7.14	22.25	6.56	11.50	4.08
6	0.2	5.08	4	36.75	9.91	32.00	8.81	16.50	5.23
7	0.25	6.35	5	45.25	11.88	40.50	10.78	25.25	7.25
8	0.3	7.62	6	52.50	13.57	48.50	12.64	32.00	8.81
9	0.4	10.36	8	69.75	17.57	64.25	16.29	44.00	11.59
10	0.5	12.7	10	80.00	19.96	75.00	18.80	56.50	14.49



Tabla 53: Etapa de penetración- CBR con polímero al 1%- Tramo 1

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area					
Lectura	Penetracion		Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
	Pug	mm		Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	2.75	2.06	1.25	1.72	2.00	1.89
2	0.05	1.27	1	8.25	3.33	5.00	2.58	3.50	2.24
3	0.075	1.905	1.5	12.25	4.25	8.50	3.39	5.00	2.58
4	0.1	2.54	2	17.00	5.35	14.75	4.83	7.75	3.22
5	0.15	3.81	3	27.50	7.77	24.75	7.14	13.00	4.43
6	0.2	5.08	4	40.75	10.84	35.75	9.68	18.75	5.75
7	0.25	6.35	5	49.50	12.87	45.25	11.88	26.75	7.60
8	0.3	7.62	6	58.50	14.96	55.00	14.15	34.75	9.45
9	0.4	10.36	8	78.00	19.50	71.50	17.98	50.00	12.98
10	0.5	12.7	10	93.00	22.99	85.75	21.30	64.25	16.29

Tabla 54: Etapa de penetración- CBR con polímero al 1.5%- Tramo 1

F.Anillo				Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Área					
Lectura	Penetración		Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES	
	Pug	mm		Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	2.75	2.06	1.50	1.78	2.00	1.89
2	0.05	1.27	1	8.50	3.39	5.25	2.64	3.50	2.24
3	0.075	1.905	1.5	13.00	4.43	9.00	3.50	5.00	2.58
4	0.1	2.54	2	17.75	5.52	15.50	5.00	8.00	3.27
5	0.15	3.81	3	28.75	8.06	25.75	7.37	13.50	4.54
6	0.2	5.08	4	42.50	11.25	37.25	10.03	19.50	5.93
7	0.25	6.35	5	51.75	13.39	47.25	12.35	27.75	7.83
8	0.3	7.62	6	61.25	15.60	57.50	14.73	36.25	9.80
9	0.4	10.36	8	81.50	20.31	75.00	18.80	51.75	13.39
10	0.5	12.7	10	94.25	23.29	90.00	22.29	67.25	16.99



Tabla 55: Etapa de penetración- CBR con polímero al 2%- Tramo 1

F.Anillo		Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Area							
Lectura	Penetracion	Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES		
			Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	2.75	2.06	1.50	1.78	1.25	1.72
2	0.05	1.27	1	8.00	3.27	4.75	2.52	3.50	2.24
3	0.075	1.905	1.5	12.25	4.25	8.25	3.33	4.75	2.52
4	0.1	2.54	2	16.75	5.29	14.50	4.77	7.50	3.16
5	0.15	3.81	3	27.00	7.66	24.25	7.02	12.75	4.37
6	0.2	5.08	4	40.00	10.67	35.00	9.51	18.25	5.64
7	0.25	6.35	5	48.75	12.69	44.25	11.65	26.00	7.43
8	0.3	7.62	6	57.50	14.73	54.00	13.92	34.00	9.28
9	0.4	10.36	8	76.75	19.20	70.50	17.75	48.50	12.64
10	0.5	12.7	10	88.50	21.94	84.25	20.95	63.00	16.00

### 3.5.3. Selección del porcentaje óptimo de la cal

Para poder hallar el porcentaje óptimo de Cal en los especímenes, se tuvo que evaluar en relación al ensayo de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, proctor modificado y CBR.

Según la guía referencial para la selección del tipo de estabilizador del manual de carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos, indica:

Según la clase de suelo, la restricción en el límite líquido, índice de plasticidad se puede determinar un estabilizador recomendado por la norma.

Habiendo realizado la clasificación de suelo de nuestro material extraído de la carretera de Maras-Moray, la calicata más crítica nos indica que nuestro suelo es CL (Arcilla ligera arenosa) según SUCS y según AASHTO es A-6 (12), según la Guía referencial para la selección del Tipo de estabilizador nos indica que esta en el grupo 3.

Así mismo habiendo realizado el ensayo de Límites de Atterberg del suelo natural de la calicata más crítica nos da un límite líquido promedio de 32.5%, un límite plástico de 17.2%, y un índice de plasticidad de 15.4%, por tal motivo si ubicamos todos los datos en la Guía referencial para la selección del Tipo de Estabilizador nos indica que el tipo de estabilizador será la cal.



Tabla 56: Guía referencial para la selección del tipo de Estabilizador del Manual de Carreteras

ÁREA	CLASE DE SUELO	TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO		RESTRICCIÓN EN LL Y IP DEL SUELO	RESTRICCIÓN EN EL PORCENTAJE QUE PASA LA MALLA 200	OBSERVACIONES
3	CH ó CL ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1)	Cemento Portland	LL no menor de 40 IP no menor de 20		Suelos orgánicos y fuertemente ácidos contenidos en esta área no son susceptibles a la estabilización por métodos ordinarios
		(2)	Cal	IP no menor de 12		

Fuente: MTC. - 2014

Una vez reconocido el tipo de estabilizador que mejor se adapte a nuestro material de la carretera Maras- Moray, en este caso la Cal, nos guiamos con respecto al siguiente cuadro de la guía complementaria referencial para la selección del tipo de estabilizador:

Tabla 57: Guía Complementaria Referencial para la selección del tipo de estabilizador- 2do cuadro de la norma

TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	NORMAS TÉCNICAS	SUELO <sup>(1)</sup>	DOSIFICACIÓN <sup>(2)</sup>	CURADO (APERTURA AL TRÁNSITO) <sup>(3)</sup>	OBSERVACIONES
Cal	EG-CBT-2008 Sección 3078 AASHTO M216 ASTM C977	A-2-6, A-2-7, A-6 y A-7 10% ≤ IP ≤ 50% CMI <sup>(4)</sup> < 3.0% Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) < 0.2% Abrasión < 50%	2 - 8%	Mínimo 72 horas	Para IP > 50%, se puede aplicar cal en dos etapas Diseño de mezcla de acuerdo a la Norma ASTM D 6276

Fuente MTC (2014)

Una vez obtenido el estabilizador recomendado por la guía complementaria podemos interpretar que existe una dosificación referencial del 2% al 8% según la norma, por tal motivo se tuvo que analizar una dosificación óptima.

Con respecto a la dosificación se tuvo como porcentaje el 2.5%, 3.5%, 4.5% y 5.5% de cal con respecto al material seco de cada espécimen, debido a que la norma indica un rango entre el 2% y 8% aproximadamente.

Para la determinación de cal óptima en una estabilización, se tuvo que encontrar los límites de Atterberg y ver como baja la plasticidad en mezclas de suelo-cal.



## **Ensayo límite líquido, plástico e índice de plasticidad con la cal**

Para el límite líquido se agregó la cal en un 2.5%, 3.5%, 4.5% y 5.5% con respecto al material seco, para hallar el contenido de humedad y el comportamiento del material con la cal

Así mismo para el límite plástico del material añadido con cal se obtuvo el porcentaje de humedad, cuando el suelo está entre el estado plástico y el estado semisólido. El índice plástico se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y plástico, indicando la variación de la plasticidad del suelo. Los límites de Atterberg nos permiten clasificar e identificar los suelos.

### **a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba**

#### **Límite líquido con cal**

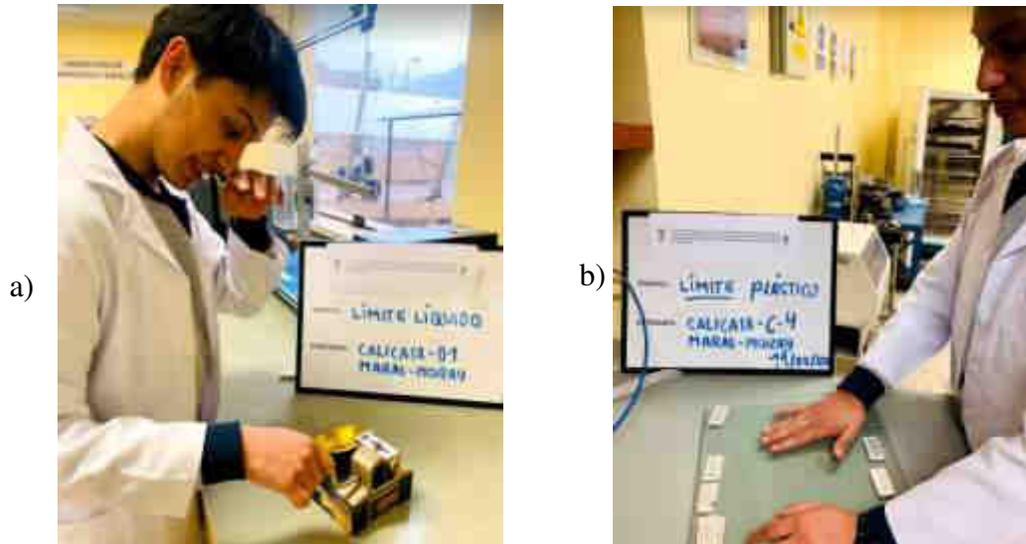
- Recipientes para almacenaje y mezcla.
- Cal
- Tamiz N°40.
- Espátula de hoja flexible.
- Aparato del límite líquido (copa de Casagrande) con su acanalador.
- Capsulas para obtener el contenido de humedad
- Balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Horno de secado.

#### **Límite plástico e índice de plasticidad con cal**

- Recipientes para Almacenaje y mezcla
- Cal
- Tamiz N°40
- Espátula de hoja flexible
- Aparato del límite líquido (copa de Casagrande) con su acanalador.
- Capsulas para obtener el contenido de humedad
- Balanza. Una balanza con sensibilidad de 0.1 gr.
- Horno de secado
- Pipeta con agua



- Placa de vidrio esmerilado de por lo menos 30cm. de lado, de forma cuadrada por 1 cm. de espesor.



*Figura 35: Límite líquido con el 2.5%, 3.5%,4,5% y 5.5% de cal “a)”,  
Límite plástico con el 2.5%, 3.5%,4,5% y 5.5% de cal “b)”*

## b) Procedimiento

### Límite líquido

Se obtuvo una muestra, alrededor de 200 gr, de material pasante por el tamiz N° 40, se humedeció con agua destilada y se mezcló.

Luego se colocó una porción en la cuchara de Casagrande (previamente calibrada) y se esparció formando una superficie aproximadamente horizontal, para luego dividirla en dos con ayuda del acanalador y levantar y soltar (1 golpe) la cuchara de Casagrande, girando el manubrio del equipo a una velocidad de dos golpes por segundo, hasta que las mitades tengan un contacto de 13 mm. Se tomó una tajada de la muestra, en la zona en la cual se deslizó, la colocamos en un recipiente de peso conocido y pesamos el conjunto para luego determinar su contenido de humedad.

Registramos el número de golpes para el cierre y mezclamos nuevamente toda la muestra añadiendo un poco de agua destilada, para aumentar su contenido de humedad y disminuir el número de golpes necesarios para cerrar la ranura.



Se repitió el proceso, desde el colocado de la muestra, hasta obtener tres pruebas adicionales. Produciendo al final, números de golpes necesarios para el cierre de la ranura que varíen  $7 \pm 1$  golpes, uno respecto al otro, y entre un rango de 10 a 35 golpes.

### Límite plástico

El límite plástico es la humedad correspondiente en el cual el suelo se cuarteo y quiebra al formar pequeños rollitos de 3.2 mm de diámetro.

Se trabaja con el material preparado para el límite líquido se toma aproximadamente 20gr.

Se amasa el suelo y se deja que pierda humedad hasta una consistencia a la cuál pueda enrollarse sin que se pegue a las manos esparciéndolo y mezclándolo continuamente sobre la placa de vidrio, la prueba continúa hasta que el rollito empieza a rajarse y tiende a desmoronarse.

Una vez que se ha producido el límite plástico se debe colocar el rollito en un recipiente de peso conocido y se pesa para determinar el contenido de humedad.

### c) Toma de datos

#### Límite líquido

Tabla 58: Ensayo de límite líquido con cal al 2.5%

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0444	0.0440	0.0374	0.0373
Peso del suelo seco + tara	0.0401	0.0413	0.0340	0.0339
Peso de la tara	0.0250	0.0321	0.0225	0.0228
Peso del suelo seco	0.0151	0.0092	0.0115	0.0111
Peso de agua	0.0043	0.0027	0.0034	0.0034
Contenido de humedad %	32.15%	31.05%	32.65%	32.60%
Número de golpes, N	34	29	22	15
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
<b>Límite líquido =</b>	<b>32.10%</b>			



Tabla 59: Ensayo de límite líquido con cal al 3.5%

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0422	0.041	0.0377	0.0373
Peso del suelo seco + tara	0.0409	0.0411	0.0339	0.0329
Peso de la tara	0.0231	0.0319	0.0226	0.0228
Peso del suelo seco	0.0159	0.0092	0.0115	0.0111
Peso de agua	0.0041	0.0027	0.0034	0.0034
Contenido de humedad %	30.16%	32.43%	30.19%	31.38%
Número de golpes, N	34	29	22	15
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
<b>Límite líquido =</b>	31.30%			

Tabla 60: Ensayo de límite líquido con cal al 4.5%

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0397	0.0421	0.0374	0.0373
Peso del suelo seco + tara	0.0407	0.0411	0.0340	0.0339
Peso de la tara	0.0252	0.0323	0.0225	0.0228
Peso del suelo seco	0.0153	0.0092	0.0115	0.0111
Peso de agua	0.0043	0.0027	0.0034	0.0034
Contenido de humedad %	31.94%	32.73%	32.66%	30.56%
Número de golpes, N	34	29	22	15
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
<b>Límite líquido =</b>	31.00%			



Tabla 61: Ensayo de límite líquido con cal al 5.5%

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0444	0.0440	0.0374	0.0373
Peso del suelo seco + tara	0.0401	0.0413	0.0340	0.0339
Peso de la tara	0.0250	0.0321	0.0225	0.0228
Peso del suelo seco	0.0151	0.0092	0.0115	0.0111
Peso de agua	0.0043	0.0027	0.0034	0.0034
Contenido de humedad %	32.14%	30.13%	29.98%	30.04%
Número de golpes, N	29	26	22	18
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
<b>Límite líquido =</b>	30.08%			

### Límite plástico

Tabla 62: Ensayo de límite plástico con cal al 2.5%

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0761	0.0478
Peso del suelo seco + tara	0.0749	0.0471
Peso de la tara	0.0702	0.0443
Peso del suelo seco	0.0047	0.0028
Peso de agua	0.0012	0.0007
Contenido de humedad %	22.50%	23.16%
<b>Límite plástico =</b>	23.9%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	8.10%	



Tabla 63: Ensayo de límite plástico con cal al 3.5%

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0752	0.0463
Peso del suelo seco + tara	0.0731	0.0424
Peso de la tara	0.0706	0.0441
Peso del suelo seco	0.0041	0.0022
Peso de agua	0.0012	0.0006
Contenido de humedad %	26.50%	27.32%
<b>Límite plástico =</b>	27.00%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	4.30%	

Tabla 64: Ensayo de límite plástico con cal al 4.5%

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0773	0.0472
Peso del suelo seco + tara	0.0752	0.0469
Peso de la tara	0.0704	0.0441
Peso del suelo seco	0.0043	0.0022
Peso de agua	0.0011	0.0006
Contenido de humedad %	29.45%	29.67%
<b>Límite plástico =</b>	29.27%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	1.73%	



Tabla 65: Ensayo de límite plástico con cal al 5.5%

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0762	0.0473
Peso del suelo seco + tara	0.0744	0.0470
Peso de la tara	0.0711	0.0445
Peso del suelo seco	0.0046	0.0023
Peso de agua	0.0012	0.0007
Contenido de humedad %	30.50%	30.36%
<b>Límite plástico =</b>	NP%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	NP%	

### Ensayo Proctor con cal

En el cual se determina la relación del contenido de humedad y el peso específico seco obtenido de la curva de compactación del suelo con el objetivo de determinar la densidad seca máxima para un contenido de humedad óptimo. A su vez se realiza la adición de la Cal con el suelo de la calicata 1 en un 4.5%, 5.5% y 6.5% con respecto al suelo seco.

#### a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba

- Molde de 4 o 6 pulgadas con una altura de 4,584 pulg (116,4 mm) y un volumen de 0,0333 pie<sup>3</sup> (944 cm<sup>3</sup>) y 0,075 pie<sup>3</sup> (2124 cm<sup>3</sup>) respectivamente; un plato base y un collar de extensión de 2".
- Pisón o martillo, el pisón debe caer libremente a una altura de 18 pulg.
- Balanza, con una aproximación de 1 gramo.
- Horno de secado, capaz de mantener una temperatura uniforme de  $230 \pm 9$  °F( $110 \pm 5$ °C).
- Regla metálica, rígida de una longitud conveniente pero no menor que 10 pulgadas.
- Tamices de  $\frac{1}{2}$ " (19,0 mm),  $\frac{3}{8}$ " (9,5 mm) y N° 4 (4,75mm).
- Diversas herramientas tales como cucharas, mezclador, pipeta, probetas, fuente para la mezcla completo de muestra de suelo con incrementos de agua.



## b) Procedimientos

- Se prepara mínimo cuatro (preferiblemente cinco) especímenes con contenidos de agua de modo que éstos tengan un contenido de agua lo más cercano al óptimo estimado.
- Preparar 4 ó 5 muestras de 6kg. para el método C y de 3 Kg. si se emplea el método A o B.
- Determinar y anotar la masa y volumen del molde.
- Colocar la primera capa en el molde y aplicarle 25 ó 56 golpes según el método de ensayo.
- Compactar el espécimen en cinco capas, cada capa deberá tener aproximadamente el mismo espesor, se aplicará los golpes en una relación uniforme de aproximadamente 25 golpes/minuto.
- La última capa debe quedar en el collarín de tal forma que luego pueda en rasarse.
- Determine y registre la masa del espécimen, luego remover el material del molde para extraer una porción de suelo para determinar el contenido de humedad.
- Llevar las muestras al horno para determinar la humedad.
- Repetir el procedimiento para un mínimo de 4 puntos compactados a diferentes contenidos de humedad, dos de los cuales quedan en el lado seco de la curva y los otros dos en el lado húmedo.

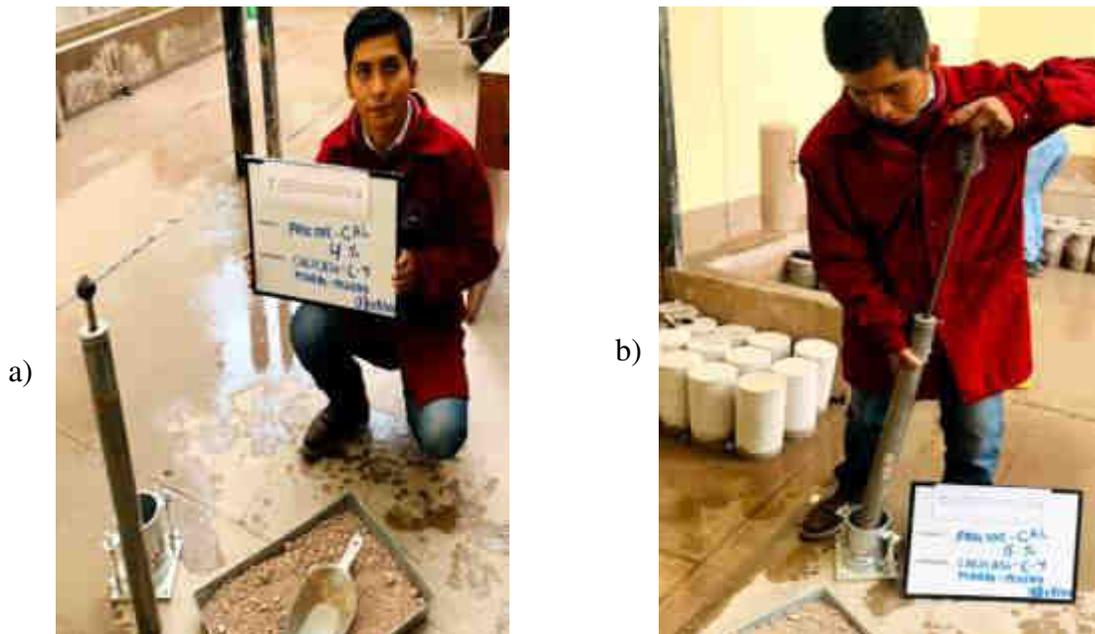


Figura 36: Ensayo de proctor modificado con 4.5% de cal “a)”, Proctor modificado con 5.5% y 6.5% de cal “b)”



**c) Toma de datos**

*Tabla 66: Ensayo de proctor modificado con cal al 5.5%*

Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del suelo + molde (gr)	3622	3712	3748	3728	3685
Peso del molde (gr)	1787	1787	1787	1787	1787
Peso de la muestra húmeda (gr)	1835	1957	2013	2027	2029
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	944	944	944	944	944
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.944	2.039	2.077	2.056	2.011
Recipiente N°	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
Peso muestra húmeda + tara (gr)	230.10	187.60	295.10	266.70	385.40
Peso muestra seca + tara (gr)	215.1	175.1	267.8	241.1	342.6
Peso del agua (gr)	15	12.5	27.3	25.6	42.8
Peso de la tara (gr)	67	68	60	61	62
Peso de la muestra seca (gr)	148.1	107.1	207.8	180.1	280.6
Contenido de humedad (%)	10.10%	11.70%	13.10%	14.20%	15.30%
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.765	1.826	1.836	1.8	1.745
DMS (gr/cm <sup>3</sup> ):	1.8390				
CHO (%):	12.90%				

**Ensayo CBR con cal**

Habiendo realizado los ensayos de CBR con el tereftalato de polietileno, se observó que en el primer tramo incremento la capacidad de soporte en 7.17%, el cual es un valor > 6%, pero en el segundo tramo se observó que la capacidad de soporte fue de 4.85%, el cual es un valor < 6%, por tal motivo se tiene que buscar otro método para poder estabilizar el suelo, como lo mencionado anteriormente se optó por aplicar la estabilización suelo- cal solo al segundo tramo por ser un suelo con gran cantidad de arcilla y ser plástico.



La cal se utilizó en una dosificación del 5.5% con respecto al peso del suelo seco, es porcentaje se obtuvo de los límites de Atterberg.

**a) Equipos y accesorios utilizados en la prueba**

- Prensa de compresión, la capacidad de la prensa y su sistema para la medida de carga debe ser de 44.5 kN (10000 lbf) o más y la precisión mínima en la medida debe ser de 44 N (10 lbf) o menos.
- Cal
- Molde de metal cilíndrico de 152,4mm de diámetro interior y de 177,8 mm de altura, un collar de metal de 50.8 mm de altura y una placa de base perforada.
- Disco espaciador de metal, de forma circular, de 150.8 mm de diámetro exterior y de 61,37 mm de espesor, para insertarlo como falso fondo en el molde cilíndrico durante la compactación.
- Pisón de compactación como el descrito en el modo operativo de ensayo Proctor Modificado.
- Aparato medidor de expansión compuesto por: Una placa de metal perforada, por cada molde, de 149.2 mm de diámetro, estará provista de un vástago en el centro con un sistema de tornillo que permita regular su altura. Un trípode cuyas patas puedan apoyarse en el borde del molde, que lleve montado y bien sujeto en el centro un dial (deformímetro), cuyo vástago coincida con el de la placa, de forma que permita controlar la posición de éste y medir la expansión, con aproximación de 0.025 mm (0.001").
- Uno o dos pesas anulares de metal que tengan una masa total de 4,54 kg y pesas ranuradas de metal cada una con masas de 2,27 kg.
- Pistón de penetración metálico de sección transversal circular, de 49.63 mm de diámetro.
- Dos diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y lecturas en 0.025 mm (0.001 ").
- Tanque para la inmersión de los moldes.
- Horno de secado
- Misceláneos, tamices, papel filtro, espátulas, enrasador, pipeta.
- Los diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y lecturas en 0.025 mm (0.001 ").
- Inmersión de los moldes.



## b) Procedimientos

- Se toma 5 kg de suelo por cada molde CBR.
- Se determina la humedad óptima y la densidad máxima por medio del ensayo de Proctor.
- Se determina la humedad natural del suelo mediante secado en estufa, según la norma MTC E 108. Conocida la humedad natural del suelo, se le añade la cantidad de agua que le falte para alcanzar la humedad fijada para el ensayo.
- Se pesa el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador y, sobre éste, un disco de papel de filtro grueso del mismo diámetro.
- Una vez preparado el molde, se compacta el espécimen utilizando en cada molde la proporción de agua y la energía necesarias para que el suelo quede con la humedad y densidad deseadas.
- La prueba se efectúa dando 56, 25 y 10 golpes por capa y con contenido de agua correspondiente a la óptima.
- Para suelos cohesivos interesa mostrar su comportamiento sobre un intervalo amplio de humedades. Las curvas se desarrollan para 56, 25 y 10 golpes por capa, con diferentes humedades, con el fin de obtener una familia de curvas que muestran la relación entre el peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.
- Si el espécimen se va a sumergir, se toma una porción de material, entre 100 y 500g (según sea fino o tenga grava) antes de la compactación y otra al final, se mezclan y se determina la humedad del Suelo. Si la muestra no va a ser sumergida, la porción de material para determinar la humedad se toma del centro de la probeta resultante de compactar el suelo en el molde, después del ensayo de penetración. Para ello el espécimen se saca del molde y se rompe por la mitad.
- Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa el espécimen por medio de un enrasador. Se desmonta el molde y se vuelve a montar invertido, sin disco espaciador, colocando un papel filtro entre el molde y la base se pesa.

## Inmersión:

- En el molde invertido se coloca la placa perforada con vástago y sobre ésta, los anillos necesarios para completar una sobrecarga. En ningún caso, la sobrecarga total será menor de 4,54 kg (10 lb).



- Se toma la primera lectura para medir el hinchamiento colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde. A continuación, se sumerge el molde en el tanque con la sobrecarga colocada dejando libre acceso al agua por la parte inferior y superior de la muestra. Se mantiene la probeta en estas condiciones durante 96 horas (4 días).
- Al final del período de inmersión, se vuelve a leer el deformímetro para medir el hinchamiento.
- Después del periodo de inmersión se saca el molde del tanque y se vierte el agua retenida en la parte superior del mismo, sosteniendo firmemente la placa y sobrecarga en su posición. Se deja escurrir el molde durante 15 minutos en su posición normal y a continuación se retira la sobrecarga y la placa perforada. Inmediatamente se pesa.

### Penetración

- Se aplica una sobrecarga que sea suficiente, para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento (con  $\pm 2.27$  kg de aproximación) pero no menor de 4.54 kg (10 lb).
- Se monta el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón y se aplica una carga de 50N (5 kg) para que el pistón asiente.
- Seguidamente se sitúan en cero las agujas de los diales medidores, el del anillo dinamométrico, u otro dispositivo para medir la carga, y el de control de la penetración.

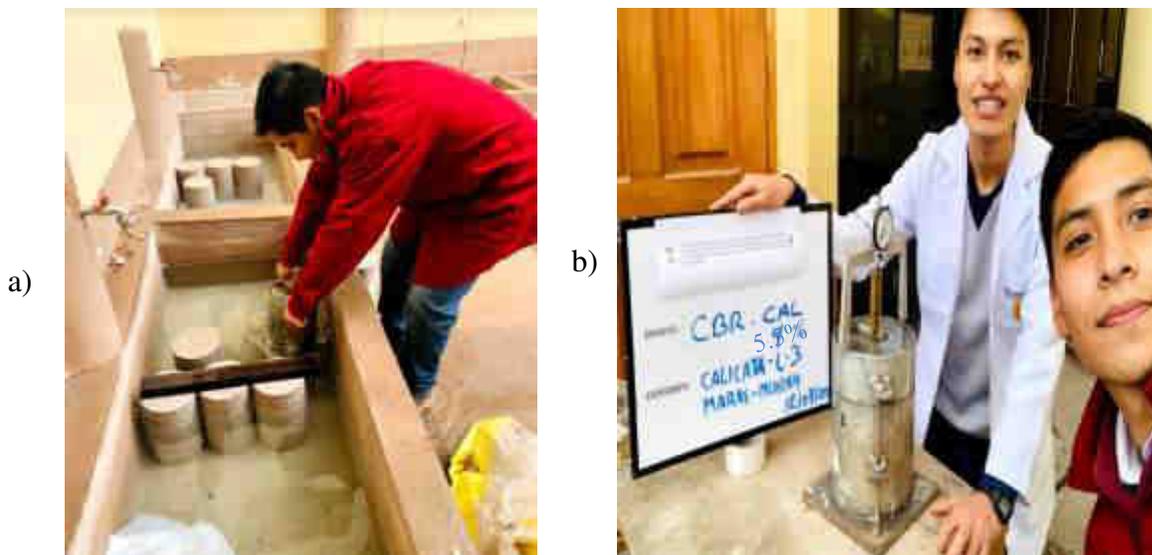


Figura 37: a) Inmersión del CBR con cal al 5.5% b) Lectura de medición de los especímenes



c) Toma de datos

Tabla 67: Características de los especímenes de ensayo- CBR con cal al 5.5%

Descripción		Espécimen N°1	Espécimen N°2	Espécimen N°3
Energía de compactación	kg-cm/cm <sup>3</sup>	4.88	12.19	27.31
Densidad seca	g/cm <sup>3</sup>	1.873	1.773	1.703
Humedad de penetración	%	11.07	12.9	11.34
Humedad de compactación	%	12.9	11.5	12.9
Absorción	%	0.953	1.245	1.848
Expansión	%	0.64	0.88	1.12
Tiempo de embebido	días	4	4	4

Tabla 68: Resumen de los resultados de ensayo- CBR con Cal al 5.5%

Molde N°	105	115	125
Capas N°	5	5	5
Golpes por capa N°	56	25	10
Condición de la muestra	SATURADO	SATURADO	SATURADO
Peso de molde + Suelo húmedo (g)	8425	9225	9047
Peso de molde (g)	3960	4993	4982
Peso del suelo húmedo (G)	4465	4232	4065
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	2128	2128	2128
Densidad húmeda (g/cm <sup>3</sup> )	2.1	1.99	1.91
Tara N°	12	25	24
Peso suelo húmedo + tara (g)	0.3241	0.3454	0.3913
Peso suelo seco + tara (g)	0.2967	0.3154	0.3537
Peso de tara (g)	0.068	0.068	0.0433
Peso de agua (g)	0.027	0.03	0.038
Peso del suelo seco (g)	0.2287	0.2474	0.3104
Contenido de humedad %	11.98%	12.13%	12.11%
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	1.873	1.773	1.703



Tabla 69: Etapa de absorción - CBR con cal al 5.5%

		N° 105	N° 115	N° 125
Peso suelo embebido + molde	Kg	9.398	9.229	9.012
Peso de molde	Kg	4.895	4.95	4.88
Peso suelo humedo embebido	Kg	4.503	4.279	4.132
Peso suelo humedo sin embeber	Kg	4.465	4.232	4.065
Peso del agua embebida	Kg	0.038	0.047	0.067
Peso del suelo seco	Kg	3.987	3.774	3.626
Absorción	%	0.953	1.245	1.848

Tabla 70: Etapa de absorción- CBR con cal al 5.5%

Tiempo	N°105			N°115			N°125		
	Dial	Expansión mm	Expansión %	Dial	Expansión mm	Expansión %	Dial	Expansión mm	Expansión %
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 día	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 días	32	0.813	0.64	44	1.118	0.88	56	1.422	1.12

Tabla 71: Etapa de penetración- CBR con cal al 5.5%

F.Anillo Esfuerzo (kg/cm2)= Carga/Área

Lectura	Penetración	Tiempo	56 GOLPES		25 GOLPES		10 GOLPES		
			Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	Lectura	Esfuerzo	
N°	Pug	mm	min	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2	Dial	kg/cm2
0	0	0	0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
1	0.025	0.625	0.5	6	2.81	5	2.58	3.5	2.24
2	0.05	1.27	1	21	6.27	14.5	4.77	14	4.66
3	0.075	1.905	1.5	38.75	10.38	27	7.66	21.5	6.39
4	0.1	2.54	2	50.25	13.04	41	10.90	26.5	7.54
5	0.15	3.81	3	73.5	18.45	61.5	15.66	33.25	9.10
6	0.2	5.08	4	97.75	24.10	72	18.10	40	10.67
7	0.25	6.35	5	107.5	26.38	82.5	20.54	45.25	11.88
8	0.3	7.62	6	114.5	28.02	91.25	22.59	51.5	13.33
9	0.4	10.36	8	125	30.48	101.25	24.92	59.5	15.19
10	0.5	12.7	10	129.5	31.54	105.5	25.91	64.25	16.29



### 3.6. Procedimiento de análisis de datos

#### 3.6.1. Caracterización del material

##### 3.6.1.1. Análisis granulométrico

###### a) Cálculos de la prueba:

- Se realizó el cálculo del porcentaje mediante las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido en el Tamiz}}{\text{Peso Total}} \times 100\% \%$$

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \% \text{ Retenido Acumulado Anterior} + \% \text{ Retenido} \%$$

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retenido acumulado} \%$$

###### b) Tablas y diagramas

Tabla 72: Procesamiento de datos del ensayo granulométrico- Tramo 1- Calicata N°1

TAMAÑO	gr.	gr.	%	%	%
MALLA	MALLA	PESO	RETENIDO	RETENIDO	QUE
ASTM	ASTM	RETENIDO	PARCIAL	ACUMULADO	PASA
1 1/2"	38.10	168.30	7.04	7.04	92.96
1"	25.40	86.10	3.60	10.64	89.36
3/4"	19.05	138.00	5.77	16.42	83.58
1/2"	12.70	117.9	4.93	21.35	78.65
3/8"	9.53	56.70	2.37	23.72	76.28
1/4"	6.35	79.00	3.31	27.03	72.97
No4	4.76	84.30	3.53	30.56	69.44
No10	2.38	207.30	8.67	39.23	60.80
No16	1.19	137.20	5.74	44.97	55.03
No30	0.59	59.50	2.49	47.46	52.54
No40	0.42	33.80	1.41	48.87	51.10
No 60	0.30	39.50	1.65	50.53	49.47
No100	0.15	51.00	2.13	52.66	47.34
No200	0.07	84.40	3.53	56.19	43.80
<b>FONDO</b>		6.00	0.25	56.44	43.56
<b>W-Wo</b>		1041.0	43.56	100.00	
<b>TOTAL</b>		2390.00	100.00		

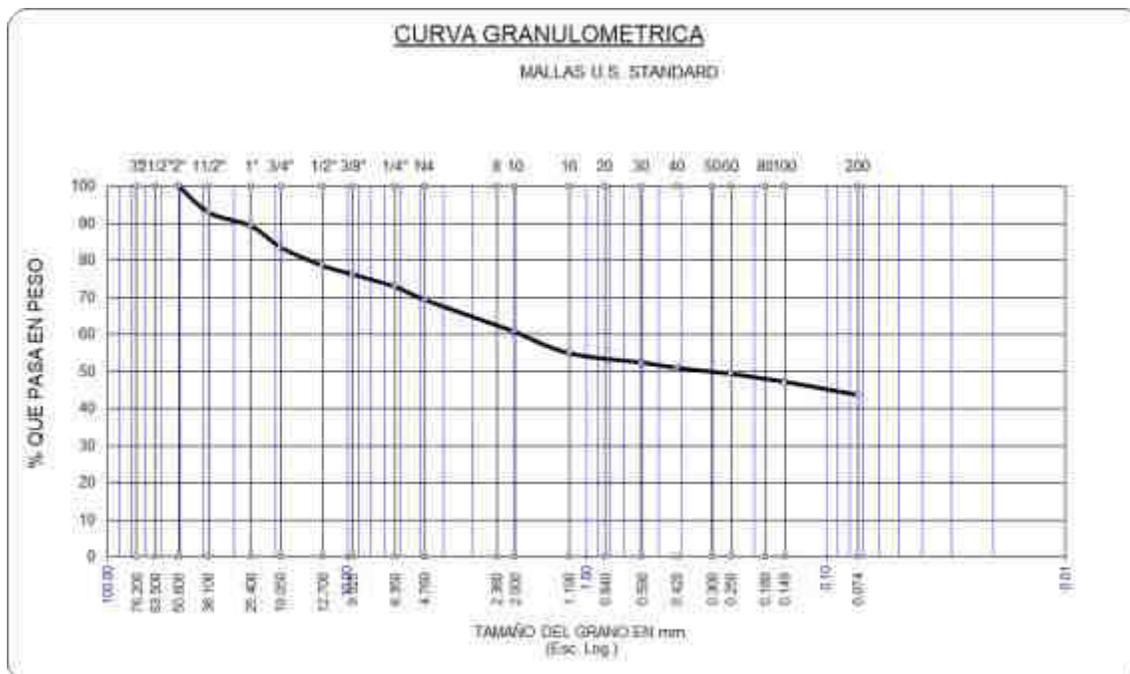


Figura 38: Curvas granulométricas- Tramo 1- Calicata N°1

Tabla 73: Procesamiento de datos del ensayo granulométrico- Tramo 1- Calicata N°2

TAMAÑO	gr.	gr.	%	%	%
MALLA ASTM	MALLA ASTM	PESO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA
2"	50.60	35.20	1.02	1.02	<b>98.98</b>
1 1/2"	38.10	280.70	8.17	9.19	<b>90.81</b>
1"	25.40	181.70	5.29	14.48	<b>85.52</b>
3/4"	19.05	210.50	6.13	20.61	<b>79.39</b>
1/2"	12.70	191.30	5.57	26.17	<b>73.83</b>
3/8"	9.53	99.20	2.89	29.06	<b>70.94</b>
1/4"	6.35	115.20	3.35	32.41	<b>67.59</b>
No4	4.76	105.30	3.06	35.48	<b>64.52</b>
No10	2.00	274.30	7.98	43.46	<b>56.54</b>
No16	1.19	159.20	4.63	48.09	<b>51.91</b>
No30	0.59	75.30	2.19	50.28	<b>49.72</b>
No40	0.42	39.30	1.14	51.43	<b>48.57</b>
No 50	0.30	48.40	1.41	51.81	<b>48.19</b>
No100	0.15	66.10	1.92	54.76	<b>45.24</b>
No200	0.07	108.20	3.15	57.91	<b>42.09</b>
<b>FONDO</b>		8.20	0.24	58.15	<b>41.85</b>
<b>W-Wo</b>		1438.20	41.85	100.00	
<b>TOTAL</b>		3436.30	100.0		

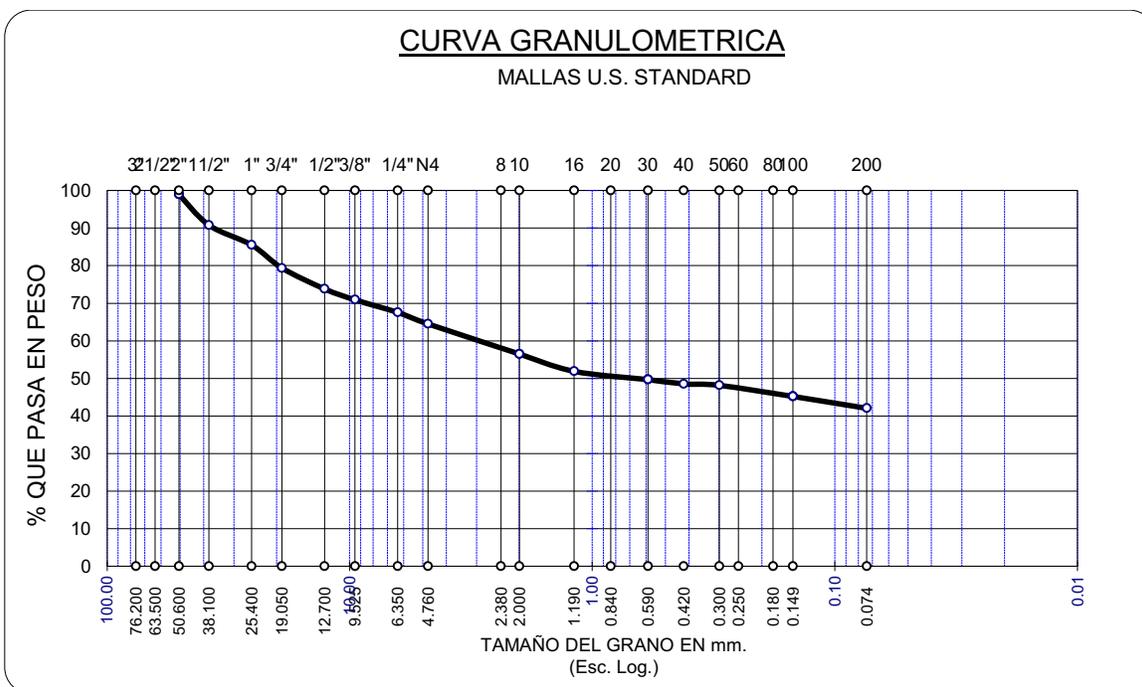


Figura 39: Curvas granulométricas- Tramo 1- Calicata N°2

Tabla 74: Procesamiento de datos del ensayo granulométrico- Tramo 2- Calicata N°3

TAMAÑO	gr.	gr.	%	%	%
MALLA ASTM	MALLA ASTM	PESO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA
2"	50.60	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
3/4"	19.05	25.50	1.91	1.91	<b>98.09</b>
1/2"	12.70	14.50	1.08	2.99	<b>97.01</b>
3/8"	9.53	25.50	1.91	4.90	<b>95.10</b>
1/4"	6.35	44.50	3.33	8.23	<b>91.77</b>
No4	4.76	35.40	2.65	10.88	<b>89.12</b>
No10	2.00	80.40	6.02	16.89	<b>83.11</b>
No20	0.84	80.30	6.01	22.90	<b>77.10</b>
No30	0.59	65.00	4.86	27.76	<b>72.24</b>
No40	0.42	35.40	2.65	30.41	<b>69.59</b>
No60	0.25	55.00	4.11	34.53	<b>65.47</b>
No100	0.15	25.40	1.90	36.43	<b>63.57</b>
No200	0.07	25.00	1.87	38.30	<b>61.70</b>
<b>FONDO</b>		14.20	1.06	39.36	<b>60.64</b>
<b>W-W<sub>0</sub></b>		982.40	73.50	112.86	
<b>TOTAL</b>		1508.50	112.9		

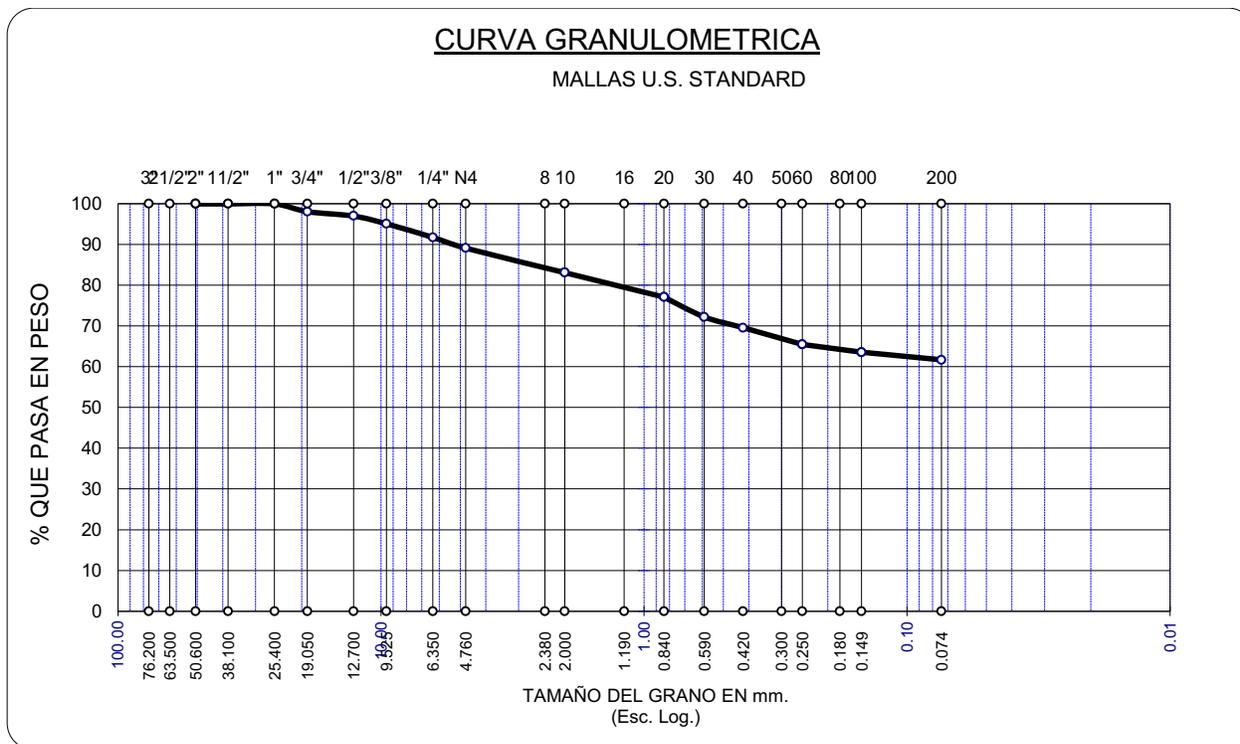


Figura 40: Curvas granulométricas- Tramo 2- Calicata N°3

Tabla 75: Procesamiento de datos del ensayo granulométría – Tramo 2- Calicata N°4

TAMAÑO	gr.	gr.	%	%	%
MALLA ASTM	MALLA ASTM	PESO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	RETENIDO ACUMULADO	QUE PASA
2"	50.60	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	<b>100.00</b>
3/4"	19.05	4.90	0.37	0.37	<b>99.63</b>
1/2"	12.70	14.50	1.08	1.45	<b>98.55</b>
3/8"	9.53	15.20	1.14	2.59	<b>97.41</b>
1/4"	6.35	33.20	2.48	5.07	<b>94.93</b>
No4	4.76	25.60	1.92	6.99	<b>93.01</b>
No10	2.00	42.00	3.14	10.13	<b>89.87</b>
No20	0.84	33.80	2.53	12.66	<b>87.34</b>
No30	0.59	21.20	1.59	14.25	<b>85.75</b>
No40	0.42	12.50	0.94	15.18	<b>84.82</b>
No60	0.25	23.20	1.74	16.92	<b>83.08</b>
No100	0.15	44.50	3.33	20.25	<b>79.75</b>
No200	0.07	69.40	5.19	25.44	<b>74.56</b>
<b>FONDO</b>		14.20	1.06	26.50	<b>73.50</b>
<b>W-W<sub>o</sub></b>		982.40	73.50	100.00	
<b>TOTAL</b>		1336.60	100.0		

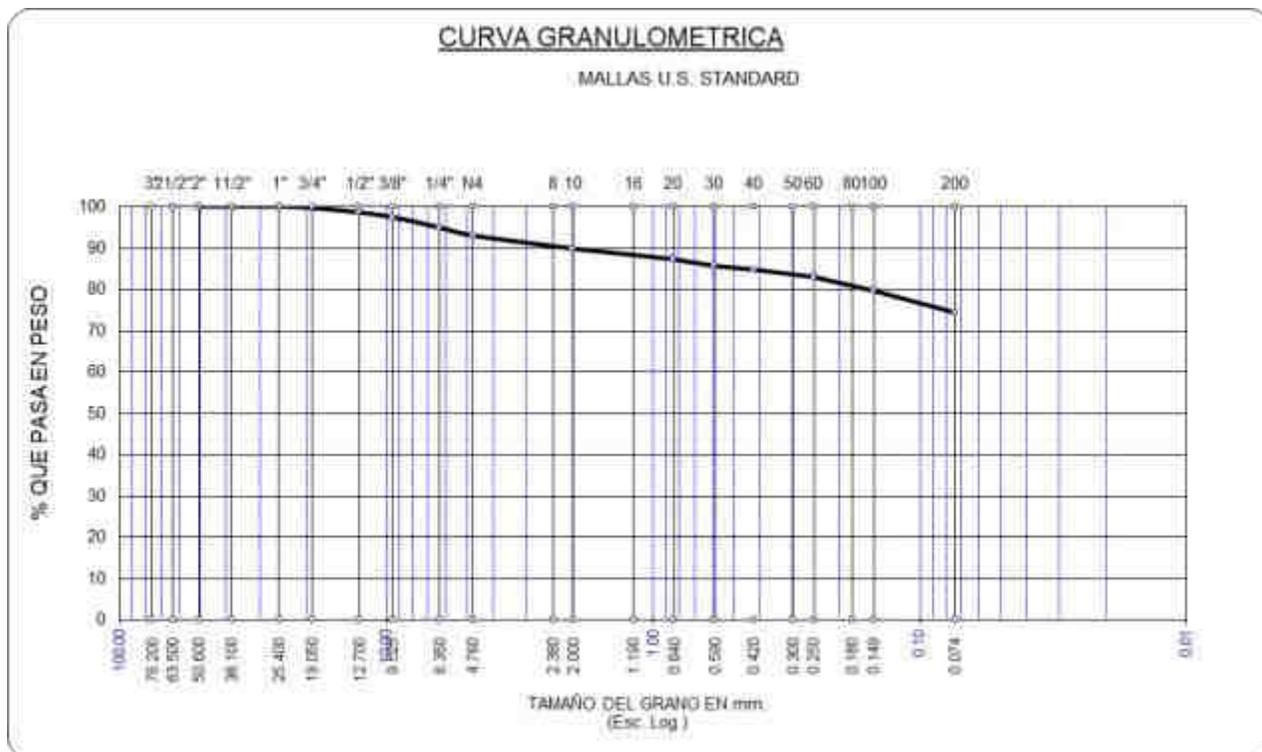


Figura 41: Curvas granulométricas- Tramo 2- Calicata N°4

**c) Análisis de la prueba**

El análisis granulométrico de los dos tramos (4 calicatas) nos sirve para poder apreciar las distribuciones del suelo. En la tabla 1 se muestra el resumen de los de los datos. Con límites establecidos en la norma ASTM C33 para agregado fino, de tamaño máximo nominal 3/8" si cumple con los requisitos de la misma norma. En promedio el 43% pasa la malla N°200 y en el segundo tramo el material fino es de 76% indicando la gran presencia de material limo arcilloso.

**3.6.1.2. Gravedad específica**

**a) Procesamiento o cálculos de la prueba**

El peso específico de la fracción fina se calcula con la siguiente formula:

$$G_s = \frac{W_o * K}{(W_o + W_2 - W_1)}$$



Dónde:

W1 = peso del frasco (picnómetro)+ peso del suelo+ peso del agua en gr.

W2 = peso del frasco (picnómetro)+ peso del agua en gr.

K= Factor de corrección por temperatura del agua de ensayo.

**b) Diagramas, tablas**

*Tabla 76: Gravedad específica- Calicata N°1*

GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	2	3
Capacidad del picnómetro (cm3)	250	250	250
Peso del suelo seco (gr)	80	80	80
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)	393.70	397.30	397.10
Temperatura ( C )	26.00	26.00	26.00
Peso del frasco + peso del agua (gr)	343.10	346.20	346.20
Corrección por temperatura (K)	0.9985	0.9985	0.9985
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.717	2.764	2.745
<b>Gravedad específica =</b>		2.742	g/cm3

*Tabla 77: Gravedad específica- Calicata N°3*

GRAVEDAD ESPECÍFICA	1	2	3
Capacidad del picnómetro (cm3)	250	250	250
Peso del suelo seco (gr)	80	80	80
Peso del frasco + peso del suelo + peso de agua (gr)	394.50	398.10	398.30
Temperatura ( C )	26.00	26.00	26.00
Peso del frasco + peso del agua (gr)	345.12	346.60	347.10
Corrección por temperatura (K)	0.9985	0.9985	0.9985
Peso específico relativo de sólidos (Gs)	2.609	2.803	2.774
<b>Gravedad específica =</b>		2.728	g/cm3



### c) Análisis de la prueba

El valor de la gravedad específica que se obtuvo se fue utilizado para calcular el volumen ocupado por el agregado en la mezcla, el valor de absorción se utiliza para la corrección por humedad de la mezcla, considerando la cantidad de humedad que contiene el agregado en el momento de la realización de la mezcla. Los datos de peso específico saturado con superficie seca y peso específico aparente se calculan con la finalidad de controlar la uniformidad de las características físicas.

#### 3.6.1.3. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Los contenidos de humedad de las muestras de los ensayos de límite líquido y plástico se calcularon de la siguiente forma:

- Peso de la muestra seca= Peso (cápsula+ muestra seca) – Peso cápsula.
- Peso del agua= Peso (cápsula + muestra húmeda) – Peso (cápsula + muestra seca)

$W^n$  = Contenido de humedad del suelo (%)

N = Número de golpes para cerrar la ranura

$$LL = W^n \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

Tabla 78: Límite líquido- Calicata N°1

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0608	0.0572	0.0487	0.0466
Peso del suelo seco + tara	0.0530	0.0495	0.0419	0.0411
Peso de la tara	0.0270	0.0244	0.0202	0.0240
Peso del suelo seco	0.0260	0.0251	0.0217	0.0171
Peso de agua	0.0078	0.0077	0.0068	0.0055
Contenido de humedad %	30.00%	30.70%	31.30%	32.16%
Número de golpes, N	40	31	21	15
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
	31.76	31.51	30.65	29.00
<b>Límite líquido =</b>	<b>30.97%</b>			



Tabla 79: Límite líquido- Calicata N°2

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0508	0.0567	0.0475	0.0444
Peso del suelo seco + tara	0.0429	0.0487	0.0417	0.0415
Peso de la tara	0.0164	0.0223	0.0228	0.0321
Peso del suelo seco	0.0265	0.0264	0.0189	0.0094
Peso de agua	0.0079	0.0080	0.0058	0.0029
Contenido de humedad %	29.80%	30.30%	30.70%	30.90%
Número de golpes, N	38	29	21	16
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
	31.35	30.85	30.06	29.28
<b>Límite líquido =</b>	<b>30.40%</b>			

Tabla 80: Límite líquido- Calicata N°3

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0631	0.0507	0.0423	0.0572
Peso del suelo seco + tara	0.0556	0.0445	0.0367	0.0506
Peso de la tara	0.0303	0.0250	0.0202	0.0321
Peso del suelo seco	0.0253	0.0195	0.0165	0.0185
Peso de agua	0.0075	0.0062	0.0056	0.0066
Contenido de humedad %	29.64%	31.79%	33.94%	35.68%
Número de golpes, N	36	28	23	18
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
	29.40	30.46	31.56	31.86
<b>Límite líquido =</b>	<b>32.53%</b>			



Tabla 81: Límite líquido- Calicata N°4

Determinación: LÍMITE LÍQUIDO	1	2	3	4
Tara	M-1	M-2	M-3	M-4
Peso del suelo húmedo + tara	0.0530	0.0501	0.0514	0.0566
Peso del suelo seco + tara	0.0458	0.0443	0.0463	0.0505
Peso de la tara	0.0202	0.0250	0.0303	0.0321
Peso del suelo seco	0.0256	0.0193	0.0160	0.0184
Peso de agua	0.0072	0.0058	0.0051	0.0061
Contenido de humedad %	28.13%	30.05%	31.88%	33.15%
Número de golpes, N	37	29	22	19
Recomendación de intervalo de golpes	40-30	30-25	25-20	20-15
	29.50	30.59	31.39	32.07
<b>Límite líquido =</b>	<b>31.05%</b>			

Para determinar el límite líquido se generó una línea de tendencia en la gráfica elaborada con el número de golpes en función del contenido de humedad, como se muestra a continuación de todas las calicatas:

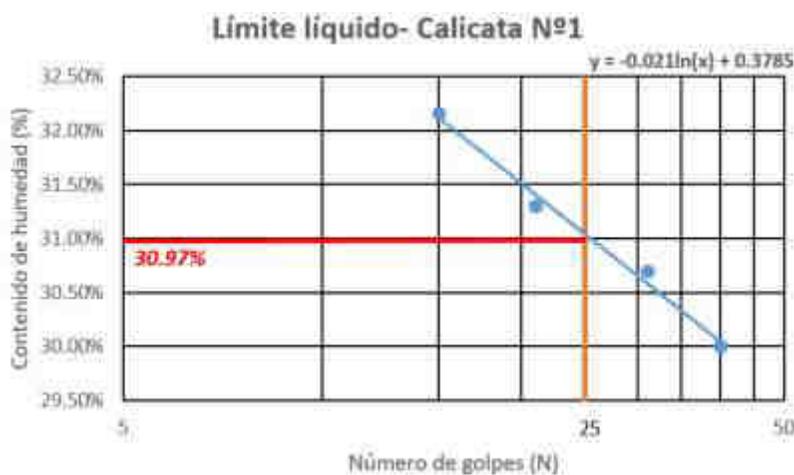


Figura 42: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°1

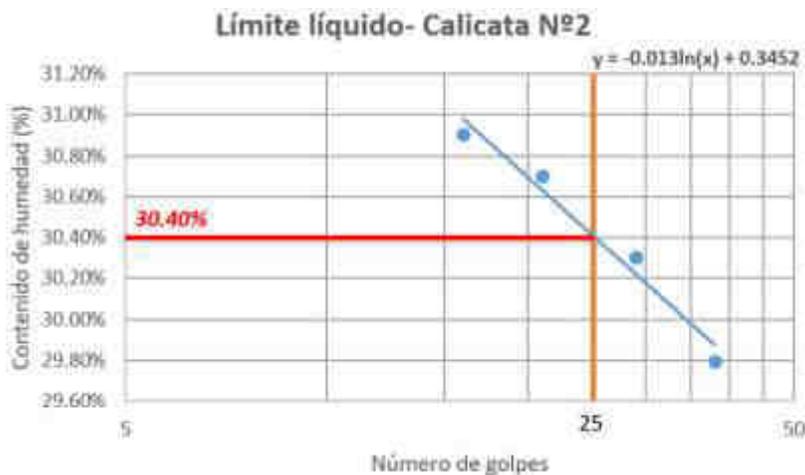


Figura 43: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°2

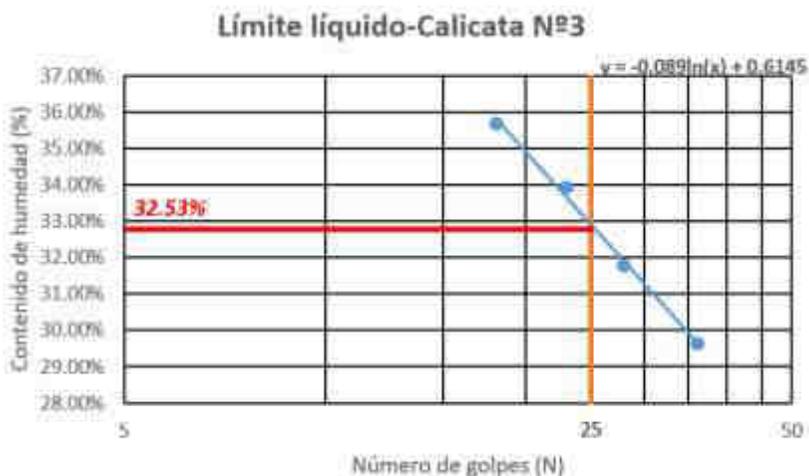


Figura 44: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°3

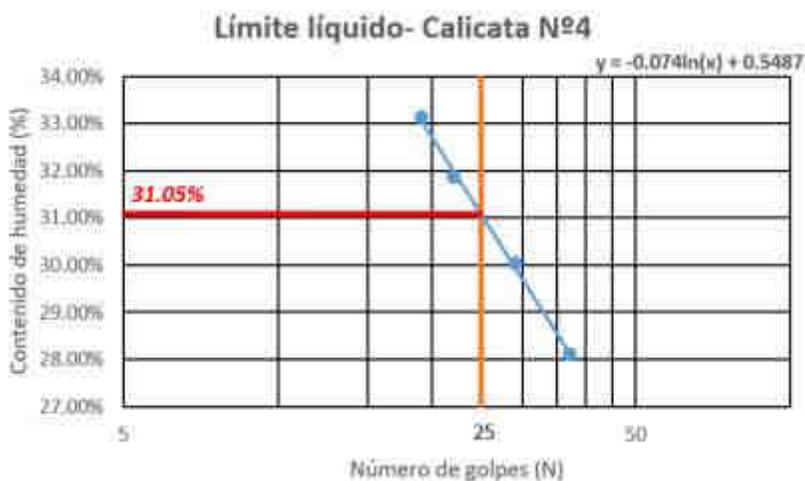


Figura 45: Línea de tendencia- Número de golpes VS contenido de humedad- Calicata N°4



c) Análisis de la prueba

El límite plástico viene a ser el promedio de los contenidos de humedad de las muestras de ensayo. En la Figura 75 se observan los valores de contenido de humedad del ensayo de límite plástico y su promedio, y la Tabla 75 muestra los resultados de los cálculos realizado.

$$LP = \frac{\text{Peso de agua (gr)}}{\text{Peso del suelo seco (gr)}} \times 100 \qquad IP = LL - LP (\%)$$

Tabla 82: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°1

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0219	0.0276
Peso del suelo seco + tara	0.0209	0.0266
Peso de la tara	0.0164	0.0223
Peso del suelo seco	0.0045	0.0043
Peso de agua	0.0010	0.0010
Contenido de humedad %	22.20%	23.30%
<b>Límite plástico =</b>	22.74%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	8.20%	

Tabla 83: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°2

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0325	0.0297
Peso del suelo seco + tara	0.0315	0.0287
Peso de la tara	0.0271	0.0245
Peso del suelo seco	0.0044	0.0042
Peso de agua	0.0010	0.0010
Contenido de humedad %	22.70%	23.80%
<b>Límite plástico =</b>	23.27%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	7.1%	



*Tabla 84: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°3*

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0283	0.0382
Peso del suelo seco + tara	0.0275	0.0373
Peso de la tara	0.0228	0.0321
Peso del suelo seco	0.0047	0.0052
Peso de agua	0.0008	0.0009
Contenido de humedad %	17.02%	17.31%
<b>Límite plástico =</b>	17.20%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	15.4%	

*Tabla 85: Límite plástico e Índice de plasticidad- Calicata N°4*

Determinación: LÍMITE PLÁSTICO	1	2
Tara	M-1	M-2
Peso del suelo húmedo + tara	0.0291	0.0411
Peso del suelo seco + tara	0.0281	0.0403
Peso de la tara	0.0226	0.0358
Peso del suelo seco	0.0055	0.0045
Peso de agua	0.0010	0.0008
Contenido de humedad %	18.18%	17.78%
<b>Límite plástico =</b>	17.98%	
<b>Índice de plasticidad =</b>	13.1%	

De acuerdo a los valores de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, en el primer tramo en promedio tienen un IP menor al 10% y el segundo tramo en promedio tiene un IP mayor al 10%. Es importante considerar que los ensayos del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, nos permiten clasificar el suelo y en el caso de mejorar el suelo, nos ayuda a tomar la mejor decisión sobre el tipo de estabilizador a utilizar, por tal motivo se utilizó el estabilizante recomendando por las normas de MTC.



### 3.6.1.4. Clasificación del suelo

#### 3.6.1.4.1. Sistema unificado de clasificación de suelo (SUCS)

Para su clasificación SUCS se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes la malla N°4, N°200 y las características plásticas, por consiguiente, se determinaron los siguientes datos:

- % de grava= Porcentaje retenido acumulado en el tamiz N°4
- % de arena= Porcentaje pasante tamiz N°4 y retenido tamiz N° 200
- % de finos= Porcentaje pasante el tamiz N°200
- Fracción de gruesos= Porcentaje de grava+ Porcentaje de arena
- Fracción de finos= Porcentaje de finos
- % de gravas de fracción gruesa= Porcentaje de gravas/ Fracción de gruesos
- % de arenas de fracción gruesa= Porcentaje de arena/ Fracción de gruesos

Del análisis granulométrico de la Calicata N°1, se tienen los siguientes resultados:

- %grava= 39.20%
- %arena= 17.00%
- %pasa N° 200= 56.19%
- LL= 30.97%
- IP= 8.20%

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos <sup>a</sup>	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$ <sup>b</sup>	GW
		Gravas con finos	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$ <sup>b</sup>	GP
		Más de 12% finos <sup>a,d</sup>	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM
			$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos <sup>a</sup>	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$ <sup>b</sup>	SW
		Arenas con finos	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$ <sup>b</sup>	SP
		Más de 12% finos <sup>a,d</sup>	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM
			$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC
	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	CL ML
		Orgánico	Límite líquido/ secado $< 0.75$ ; vea la figura 4.2; zona OL	OL
			Límite líquido/ no secado	
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos $PI$ en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos $PI$ por debajo de "A" línea (figura 4.2)	CH MH
		Orgánico	Límite líquido/ secado $< 0.75$ ; vea la figura 4.2; zona OH	OH
			Límite líquido/ no secado	

Figura 46: Clasificación de suelos según SUCS- Braja M. Das- Calicata N°1

Fuente: Braja. M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

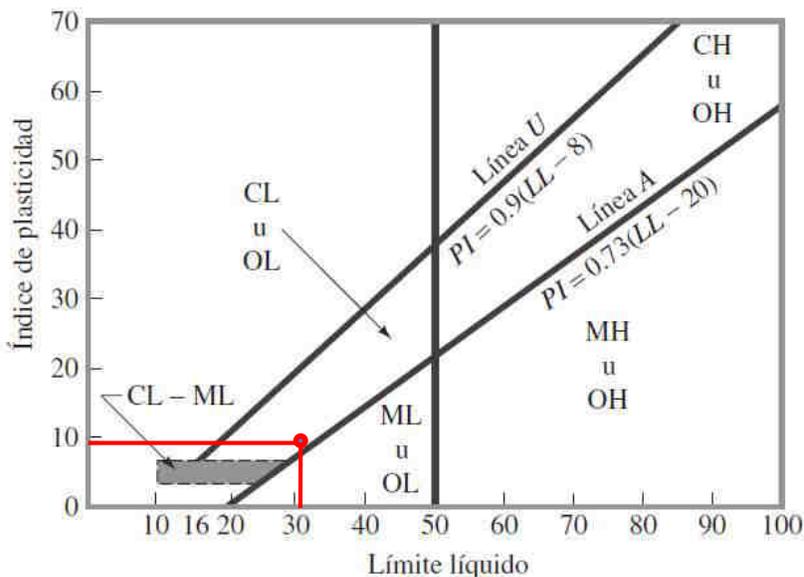


Figura 47: Clasificación del material del suelo fino (Carta plasticidad)

Fuente: Elaboración propia en base a Menéndez Acurio (2016)

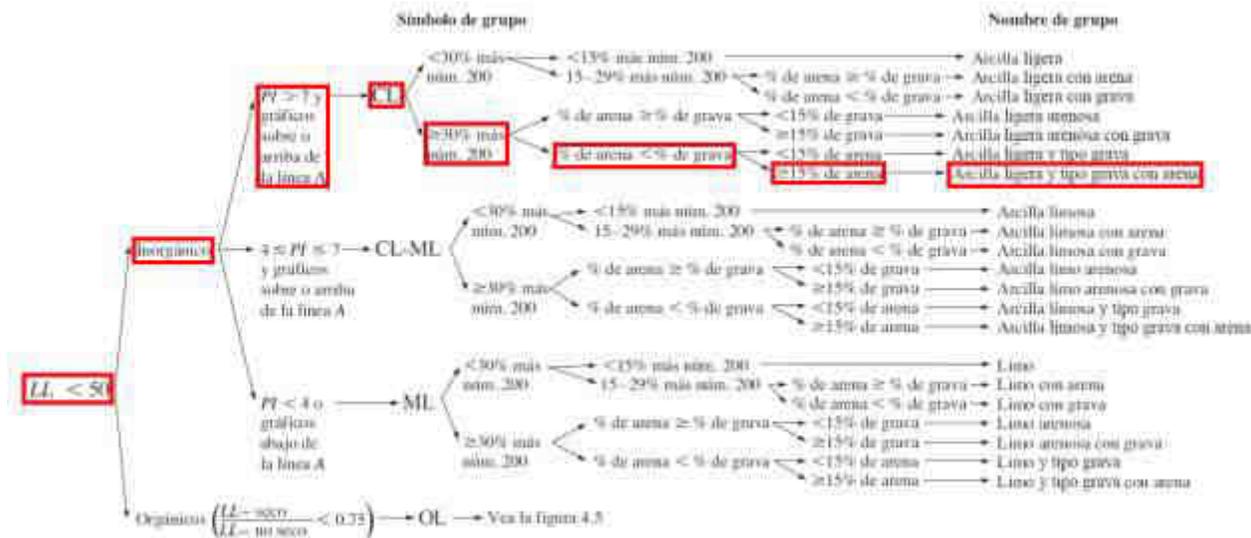


Figura 48: Tabla de clasificación de suelos- SUCs- Braja. M. Das- Calicata N°1

Fuente: Braja. M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

Símbolo de grupo para la Calicata N°1 = CL

Nombre de grupo para la Calicata N°1 = Arcilla ligera y tipo grava con arena



### 3.6.1.4.2. Clasificación AASHTO

Para la clasificación AASHTO se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes la malla N° 10, N° 40, N° 200; las características plásticas y el índice de grupo. Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras es muy importante conocer el índice de grupo (IG), que está en función del LL, IP y el porcentaje pasante la malla N°200. **% pasa N°10= 60.80%**

- **% pasa N°40= 51.10%**
- **% pasa N°200= 56.19%**
- **LL= 30.97%**
- **IP= 8.20%**

Clasificación general	Materiales granulares (35% o más del total de la muestra pasada por el núm. 200)			
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos		Suelos arcillosos
Clasificación general de la subrasante			Regular a malo	

\*Para A-7-5,  $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6,  $PI > LL - 30$

Figura 49: Tabla de clasificación de suelos- AASHTO- Braja M. Das- Calicata N°1

Fuente: Braja. M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

### Índice de grupo

índice de grupo (IG), que está en función del LL, IP y el porcentaje pasante la malla N°200. En la tabla 20 se muestra en la última columna el IG entre paréntesis, de los resultados mostrados se puede concluir que el primer tramo es un buen suelo y el segundo es "muy pobre" por tener un IG mayor a 9.



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

$$=+((56.19-35)*(0.2+0.005*(30.97-40)))+(0.01*(56.19-15)*(8.2-10))$$

$$=0.84428=1$$

Grupo de Clasificación= **A-4**

Grupo de Clasificación e Índice de grupo= **A-4 (1)**

Tabla 86: Clasificación de suelos de todas las calicatas

Calicata	Muestra	Tramo	SUCS	AASHTO
C1	M-2	T1	CL(arcilla ligera y tipo grava con arena)	<b>A-4(1)</b>
C2	M-2		CL(arcilla ligera y tipo grava con arena)	<b>A-4(0)</b>
C3	M-2	T2	CL(Arcilla ligera arenosa)	<b>A-6(12)</b>
C4	M-2		CL(Arcilla ligera arenosa)	<b>A-6(8)</b>

Fuente: Braja. M. Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica

### 3.6.1.5. Proctor Modificado

Para graficar la curva de compactación, se determinó los contenidos de humedad y densidades secas de los especímenes compactados, como se muestra a continuación:

- Volumen del molde =  $\pi * (\text{Promedio de los diámetros})^2 / 4 * (\text{Promedio de las alturas})$
- Peso suelo compactado = Peso (molde + suelo compactado) – Peso del molde
- Contenido de humedad =  $\text{Peso del agua} / \text{Peso de la muestra seca} * 100$
- Densidad húmeda =  $\text{Peso suelo compactado} / \text{Volumen del molde}$
- Densidad seca =  $\text{Densidad húmeda} / 1 + \text{Contenido de humeda}$



Tabla 87: Cálculos para determinar la curva granulométrica de la muestra PM -3

Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del suelo + molde (gr)	3638	3782	3820	3789	3711
Peso del molde (gr)	1788	1788	1788	1788	1788
Peso de la muestra húmeda (gr)	1850	1994	2032	2001	1923
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	944	944	944	944	944
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.960	2.112	2.153	2.120	2.037
Recipiente N°	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
Peso muestra húmeda + tara (gr)	370	210	299	205	285
Peso muestra seca + tara (gr)	346.9	197.8	273.7	189.9	257.6
Peso del agua (gr)	22.6	12.0	25.4	15.5	27.7
Peso de la tara (gr)	57.4	71.4	53.7	67.7	62.2
Peso de la muestra seca (gr)	289.5	126.4	220	122.2	195.4
Contenido de humedad (%)	7.8%	9.5%	11.5%	12.7%	14.2%
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.818	1.929	1.930	1.881	1.784
DMS (gr/cm <sup>3</sup> ):			1.9465		
CHO (%):			10.50%		

Tabla 88: Cálculos para determinar la curva granulométrica de la muestra PM -1

Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del suelo + molde (gr)	6155	6211	6267	6281	6283
Peso del molde (gr)	4254	4254	4254	4254	4254
Peso de la muestra húmeda (gr)	1901	1957	2013	2027	2029
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	944	944	944	944	944
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	2.014	2.073	2.132	2.147	2.149
Recipiente N°	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
Peso muestra húmeda + tara (gr)	677	632	416	408	418
Peso muestra seca + tara (gr)	635.3	585.9	379.6	368.9	372.9
Peso del agua (gr)	41.7	46.1	36.4	39.1	45.1
Peso de la tara (gr)	69	68	68	66	62.2
Peso de la muestra seca (gr)	566.3	517.9	311.6	302.9	310.7
Contenido de humedad (%)	7.4%	8.9%	11.7%	12.9%	14.5%
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.876	1.904	1.909	1.902	1.877
DMS (gr/cm <sup>3</sup> ):			1.9095		
CHO (%):			11.50%		

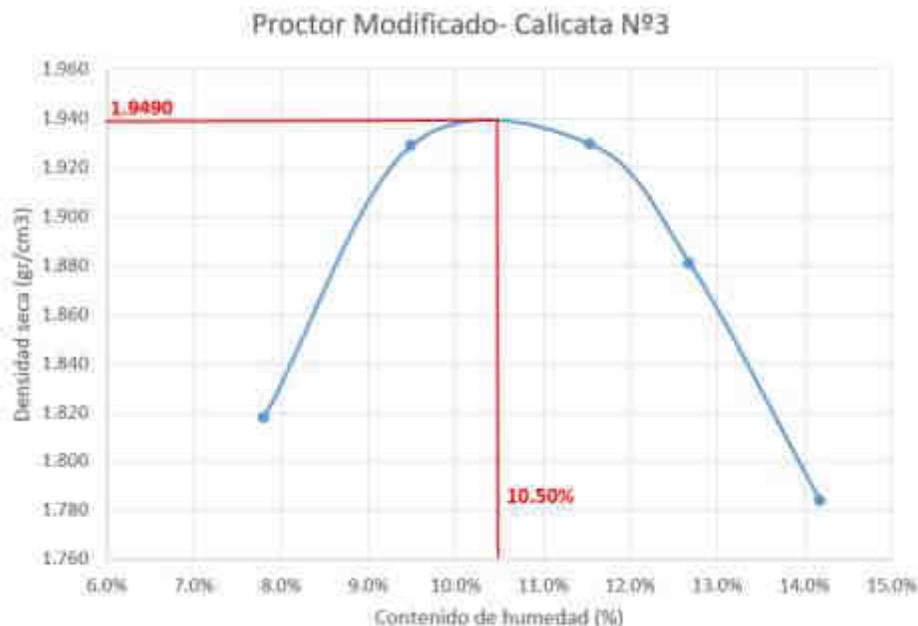
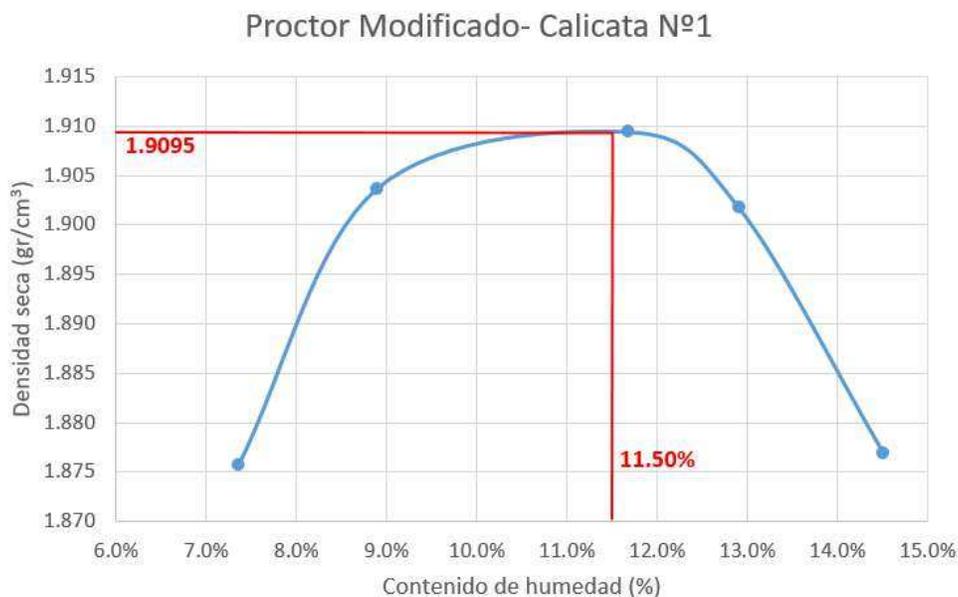


Figura 50: Muestra la curva de la compactación de la calicata N°3 y el contenido de humedad óptimo para alcanzar su máxima densidad seca.

Tabla 89: Resumen de la muestra PM-2 y contenido de humedad



Óptimo Contenido Humedad	(%)	<b>10.5</b>
Máxima Densidad Seca	(g / cm³)	<b>1.949</b>

Figura 51: Muestra la curva de la compactación de la calicata N°1 y el contenido de humedad óptimo para alcanzar su máxima densidad seca.



Tabla 90 Muestra el resumen de los resultados de la muestra natural

Optimo Contenido Humedad	(%)	<b>11.500</b>
Máxima Densidad Seca	(g / cm <sup>3</sup> )	<b>1.910</b>

### c) Análisis de la prueba

Se determinó la relación del contenido de humedad y el peso específico seco obteniendo la curva de compactación del suelo, con el objetivo de determinar la densidad seca máxima para un contenido de humedad óptimo. En la tabla 6 se muestra los resultados obtenidos de los ensayos de Proctor modificado de las calicatas N° 1 y N° 3 correspondientes al primer y segundo tramo.

#### 3.6.1.6. Valor relativo de soporte

##### 3.6.1.6.1. CBR de suelo natural

El procedimiento que se realizó para los cálculos del ensayo son los siguientes:

- Volumen del molde=  $(\pi * (\text{promedio de los diámetros})^2) / 4$
- Peso suelo compactado= Peso (molde+ suelo compactado) – Peso del molde
- Contenido de humedad antes de la inmersión=  $((\text{Peso del agua}) / (\text{Peso de la muestra seca})) * 100$
- Densidad seca=  $(\text{Peso suelo compactado}) / (1 + \text{Contenido de humedad})$
- Expansión=  $((\text{Deformación por hinchamiento}) / (\text{Altura promedio del molde} - \text{Altura del disco espaciador})) * 100$
- Peso del agua absorbida= Peso del molde+ muestra compactada (antes de sumergirse)- Peso del molde + muestra compactada
- Absorción=  $(\text{Peso del agua absorbida}) / ((\text{Peso del suelo húmedo compactado}) / 1 + \text{contenido de humedad})$
- Esfuerzo=  $(\text{carga}) / (\text{Área del pistón})$
- CBR=  $((\text{Esfuerzo}) / (\text{Esfuerzo patrón})) * 100$

Este ensayo es la más importante para la presente investigación. El ensayo de CBR se hizo para cada tramo, se evaluó la calicata más crítica como resultado del análisis granulométrico y las propiedades plásticas. En el primer tramo se eligió la calicata N°1 y en el segundo la calicata N°3.



### 3.6.1.6.2. Ensayo CBR de la subrasante natural:

#### a) Calculo del CBR natural del primer tramo:

Como se describió en la metodología aplicada, el tramo de estudio se tuvo que sectorizar en dos tramos según las características propias del suelo, para poder determinar la capacidad de soporte de cada tramo se realizó ensayos de CBR, por lo general se realiza ensayos con tres moldes variando la energía de compactación con el número de golpes, pero para esta investigación se hicieron 9 especímenes para poder tener resultados confiables.

Tabla 91: Resumen del ensayo CBR tramo 1, calicata N°1

N° Golpes		56	25	10	56	25	10	56	25	10
P.E Seco	g/cm <sup>3</sup>	1.910	1.816	1.735	1.906	1.815	1.737	1.908	1.812	1.737
Expansion	%	2.62	3.50	4.20	2.42	3.40	4.08	2.62	3.42	4.28
Absorcion	%	3.37	5.38	8.72	3.50	5.36	8.71	3.40	5.94	8.68
Esfuerzo de penetracion	0.1"	Kg/cm <sup>2</sup>	5.00	4.08	2.70	5.12	4.20	2.81	4.43	3.96
	0.2"		9.74	8.35	4.54	9.97	8.81	4.43	8.81	8.58
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/cm <sup>2</sup>	5.00	4.08	2.70	5.12	4.20	2.81	4.43	3.96
	0.2"		9.74	8.35	4.54	9.97	8.81	4.43	8.81	8.58
Valor de CBR	0.1"	%	7.10%	5.79%	3.83%	7.26%	5.95%	3.99%	6.28%	5.63%
	0.2"		9.23%	7.91%	4.30%	9.44%	8.34%	4.19%	8.34%	8.12%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 92: Promedio de CBR tramo 1, calicata N°1

CBR	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% MDS	7.10%	9.20%	7.30%	9.40%	6.30%	8.30%	6.88%	9.00%
95% MDS	5.80%	7.85%	5.84%	8.20%	5.65%	8.10%	5.76%	8.05%

Fuente: elaboración propia

Tabla 93: Promedio de la expansión y absorción- tramo 1, calicata N°1

N° Golpes		Promedio		
		56	25	10
P.E.SECO	g/cm <sup>3</sup>	1.908	1.815	1.737
EXPANSION	%	2.553	3.44	4.187
ABSORCION	%	3.423	5.559	8.702

Fuente: Elaboración propia



Figura 43 (a, b, c): Se representa el valor del CBR para las diferentes energías de compactación y su densidad seca. Para poder calcular el valor del CBR al 95% de la densidad máxima seca de los tres ensayos y nueve especímenes analizados.

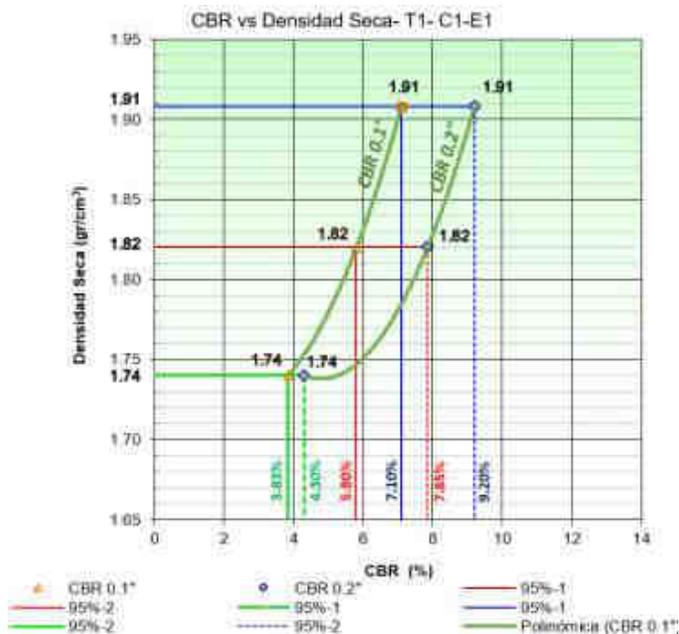


Figura 52: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°1

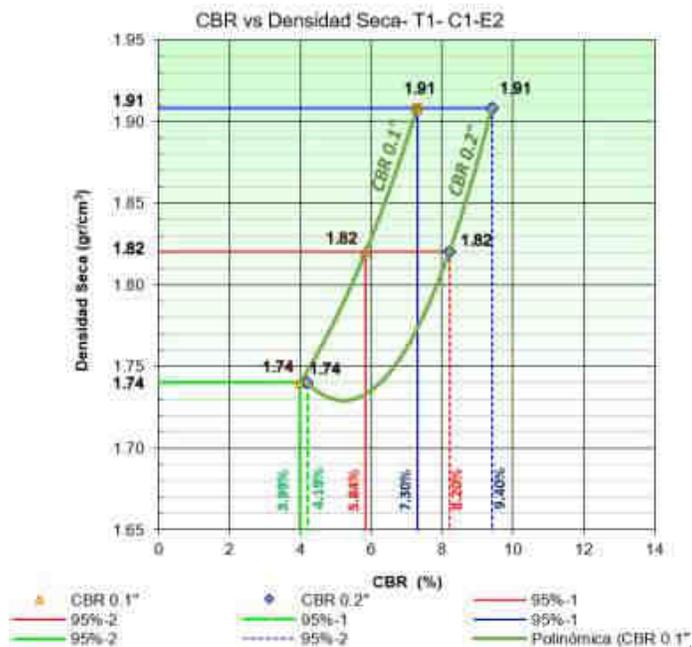


Figura 53: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°2

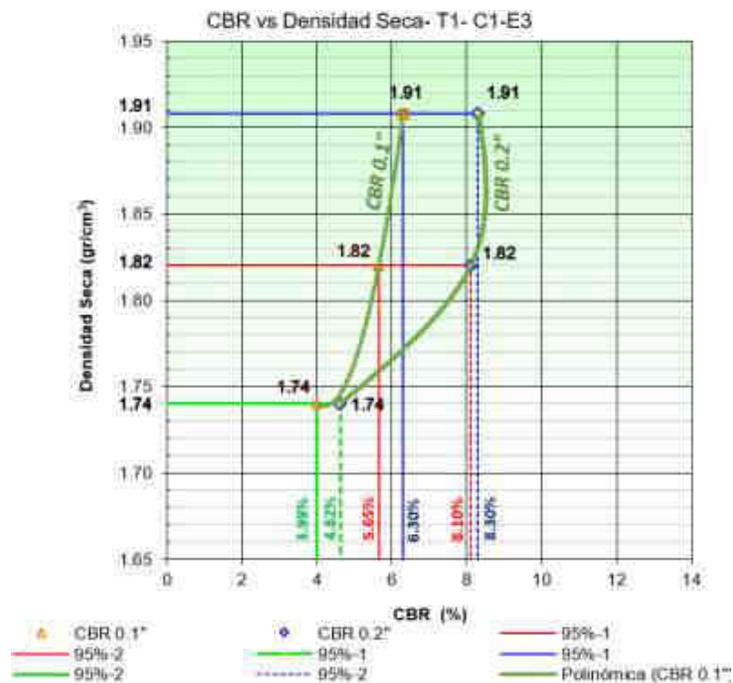


Figura 54: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°3

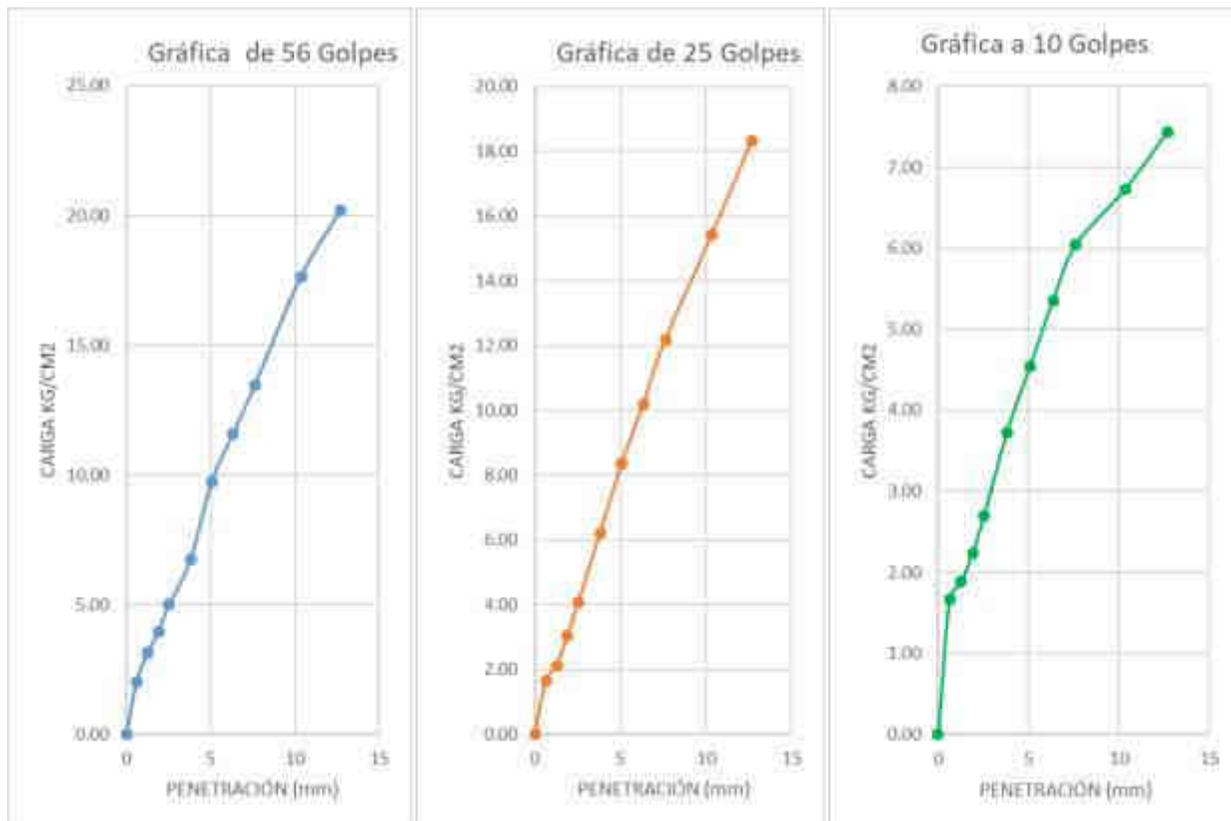


Figura 55: Grafica de penetración vs carga- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°1



**b) Calculo del CBR natural del segundo tramo**

El procediendo es el mismo aplicado para el primer tramo. En la tabla 76 se muestra el resumen de los resultados del ensayo de CBR, sumergido a dos días por tratarse de suelos arcillosos con una sobrecarga de 4,5 kg. Se determinó el porcentaje de expansión y absorción, además el valor del CBR al 95% de la DMS.

*Tabla 94: Resumen del ensayo CBR tramo 2, calicata N°3*

N° Golpes		56	25	10	56	25	10	56	25	10
P.E Seco	g/cm3	1.928	1.823	1.764	1.937	1.820	1.766	1.932	1.819	1.765
Expansion	%	3.24	4.44	4.92	3.18	4.54	4.9	3.20	4.50	4.90
Absorcion	%	4.05	6.83	11.72	4.44	7.28	11.12	4.40	7.15	11.44
Esfuerzo de penetracion	0.1"	Kg/cm2	3.53	3.16	2.70	3.45	3.22	2.70	3.41	3.23
	0.2"		4.43	3.96	3.39	4.48	3.96	3.45	4.31	4.08
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/cm2	3.53	3.16	2.70	3.45	3.22	2.70	3.41	3.23
	0.2"		4.43	3.96	3.39	4.48	3.96	3.45	4.31	4.08
Valor de CBR	0.2"	%	5.01%	4.48%	3.83%	4.89%	4.56%	3.83%	4.84%	4.58%
	0.1"		4.19%	3.75%	3.21%	4.24%	3.75%	3.26%	4.08%	3.86%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 77 y 78 se muestran el promedio aritmético de los valores de CBR, expansión y absorción.

*Tabla 95: Promedio de CBR tramo 2, calicata N° 3*

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
CBR								
100% MDS	4.20%	5.00%	4.20%	4.90%	4.10%	4.80%	4.17%	4.91%
95% MDS	3.80%	4.55%	3.84%	4.65%	3.91%	4.63%	3.85%	4.61%

Fuente: Elaboración propia

*Tabla 96: Promedio de % de exp. y abs. Tramo 2, calicata N° 3*

N° Golpes		Promedio		
		56	25	12
P.E.SECO	g/cm3	1.932	1.821	1.765
EXPANSION	%	3.207	4.493	4.907
ABSORCION	%	4.296	7.087	11.428

Fuente: Elaboración propia

Figuras 44: Se representa el valor del CBR para las diferentes energías de compactación y su densidad seca. Para poder calcular el valor del CBR al 95% de la densidad máxima seca de los tres ensayos y nueve especímenes analizados.

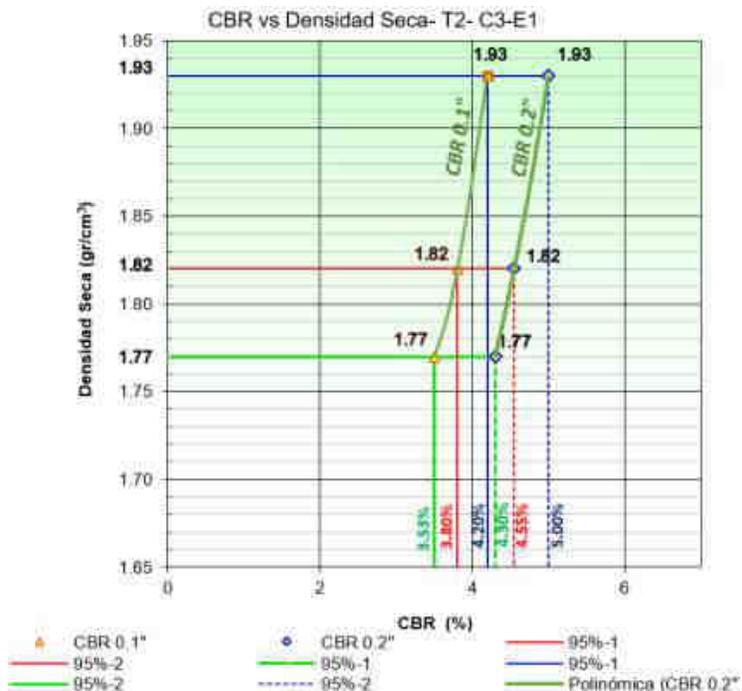


Figura 56: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°1

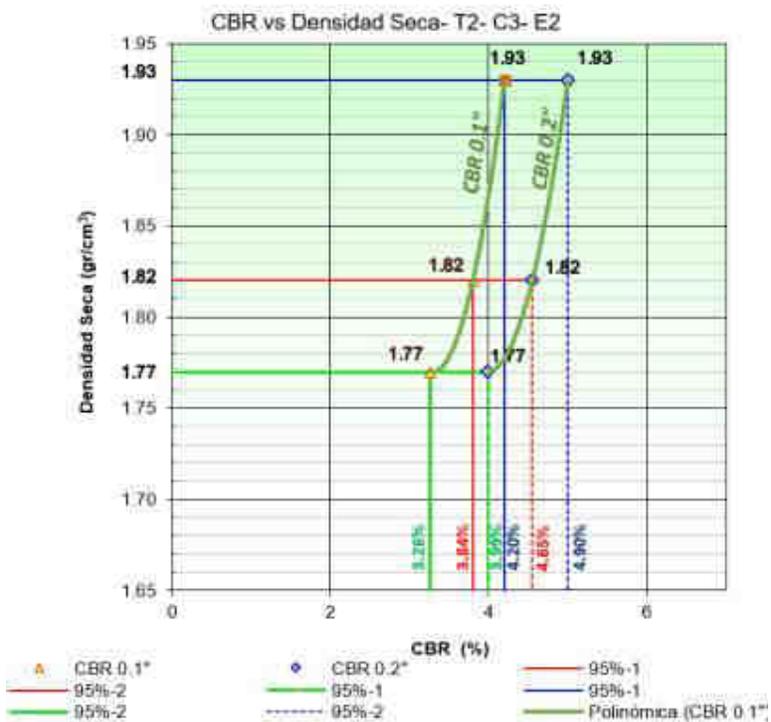


Figura 57: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°2

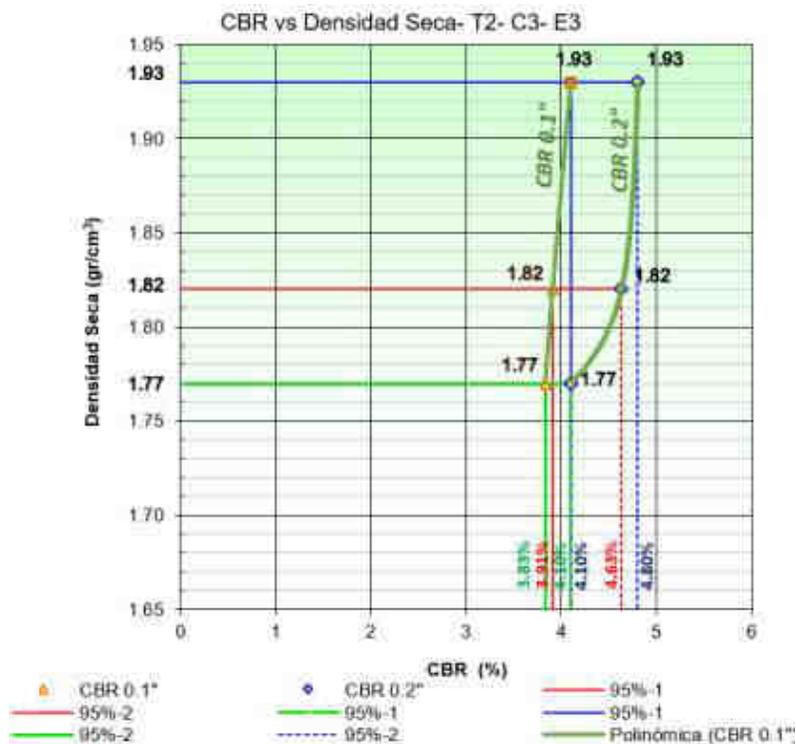


Figura 58: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°3

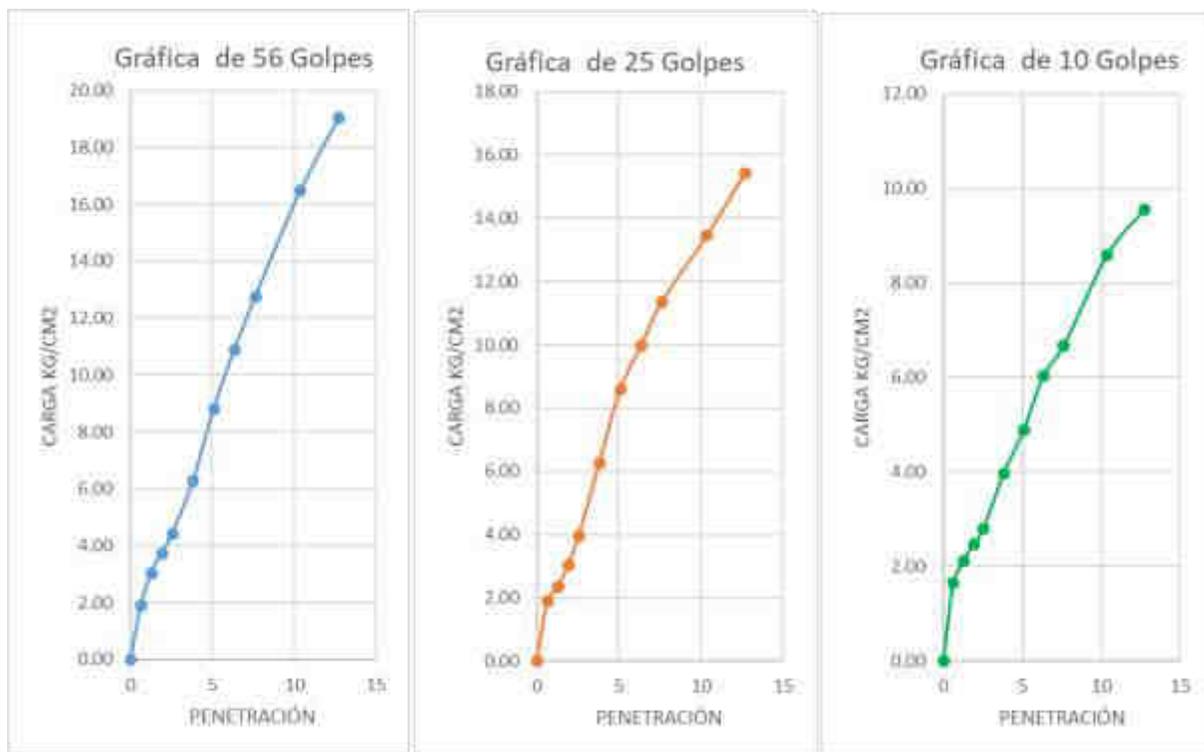


Figura 59: Grafica de penetración vs carga- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°1



### c) Análisis de la prueba

Para el análisis de este ensayo se tuvo en cuenta los valores absolutos. Los valores del CBR los suelos ensayados presentan un índice muy bajo, menor al 6%, por la carencia de grava, en los siguientes ensayos se adicionarán polímeros reciclados (Tereftalato de polietileno), para que cumpla similar función que las partículas mayores a 4.75mm (gravas), esto le dará mayor fricción y por ende mayor resistencia al CBR.

### 3.6.2. Determinación de la dosificación y uso adecuado del tereftalato de polietileno

#### a) Cálculo del CBR con Tereftalato de polietileno del primer tramo:

##### a.1) Determinación de la forma geométrica óptima del tereftalato de polietileno:

Una vez obtenido los polímeros reciclados de diferentes dimensiones, se evaluó las dimensiones y formas geométricas adecuados con el objetivo de conseguir la dosificación optima suelo - polímero para luego cuantificarlo en función al índice del CBR, para el cual se clasificaron los polímeros según sus dimensiones tamizando por las mallas estándares de un análisis granulométrico de 1 a 3, continuación se muestra los resultados del ensayo CBR asumiendo una dosificación del 1% con respecto al peso del suelo, donde se muestra el intervalo de dimensiones del tereftalato de polietileno.

Tabla 97: Resultados de CBR con polímeros al 1%

		Ensayo N°1			Ensayo N°2			Ensayo N°3			
		Tereftalato Pasante 3/4" y retenido 1/2"			Tereftalato Pasante 1/2" y retenido 3/8"			Tereftalato Pasante 3/8" y retenido 1/4"			
N° Golpes		56	25	10	56	25	10	56	25	10	
P.E Seco	g/cm3	1.851	1.752	1.683	1.862	1.763	1.693	1.866	1.767	1.697	
Expansion	%	1.3	1.76	2.2	1.2	1.66	2.1	1.18	1.62	2.06	
Absorcion	%	3.35	5.36	8.77	2.34	3.87	6.33	3.40	5.11	8.78	
Esfuerzo de penetración	0.1"	Kg/c m2	5.23	4.60	3.10	5.35	4.83	3.22	5.41	4.94	3.24
	0.2"		9.80	9.05	5.35	10.84	9.68	5.75	11.36	10.15	6.04
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/c m2	5.23	4.60	3.10	5.35	4.83	3.22	5.41	4.94	3.24
	0.2"		9.80	9.05	5.35	10.84	9.68	5.75	11.36	10.15	6.04
Valor de CBR	0.1"	%	7.43%	6.65%	4.40%	7.59%	6.95%	4.56%	7.67%	7.09%	4.60%
	0.2"		9.27%	8.70%	5.06%	10.26%	9.32%	5.44%	10.75%	9.80%	5.72%

Fuente: Elaboración propia



En la figura 45 se determina el valor del CBR al 95% de la densidad máxima seca para cada ensayo realizado.

		Ensayo N°4			Ensayo N°5			Ensayo N°6			
		Tereftalato Pasante 1/4" y retenido N°4"			Tereftalato Pasante N°4" y retenido N°8"			Tereftalato de polietileno de otra forma geométrica			
N° Golpes		56	25	10	56	25	10	56	25	10	
P.E Seco	g/cm <sup>3</sup>	1.864	1.765	1.695	1.859	1.759	1.690	1.846	1.846	1.678	
Expansion	%	1.14	1.6	2.01	1.28	1.72	2.24	1.48	1.84	2.42	
Absorcion	%	3.40	5.35	8.90	3.34	5.26	8.06	3.22	5.37	8.85	
Esfuerzo de penetración	0.1"	Kg/c m <sup>2</sup>	5.35	4.89	3.27	5.18	4.71	3.16	5.12	4.48	3.16
	0.2"		10.90	9.74	5.81	10.38	9.34	5.58	9.68	8.81	5.41
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/c m <sup>2</sup>	5.35	4.89	3.27	5.18	4.71	3.16	5.12	4.48	3.16
	0.2"		10.90	9.74	5.81	10.38	9.34	5.58	9.68	8.81	5.41
Valor de CBR	0.1"	%	7.59%	7.03%	4.65%	7.35%	6.83%	4.48%	7.26%	6.45%	4.48%
	0.2"		10.31%	9.40%	5.50%	9.82%	9.01%	5.28%	9.16%	8.50%	5.12%

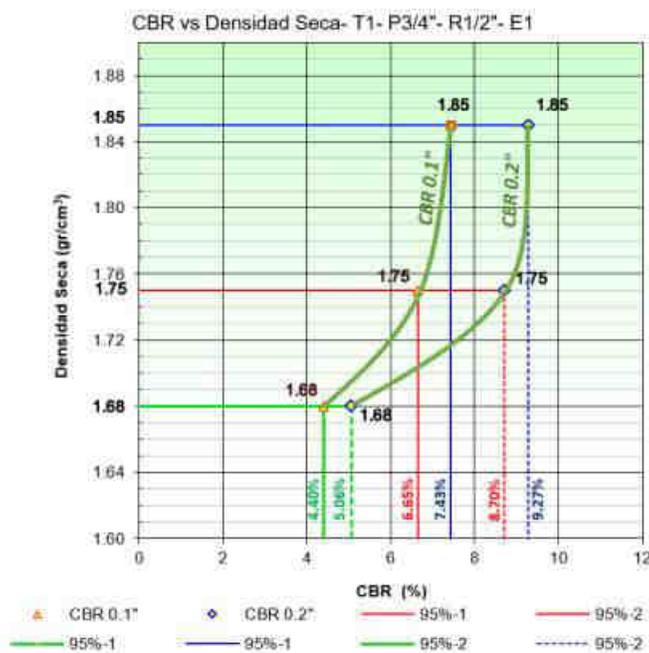


Figura 60: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 3/4"- Retenido 1/2"- Ensayo N°1

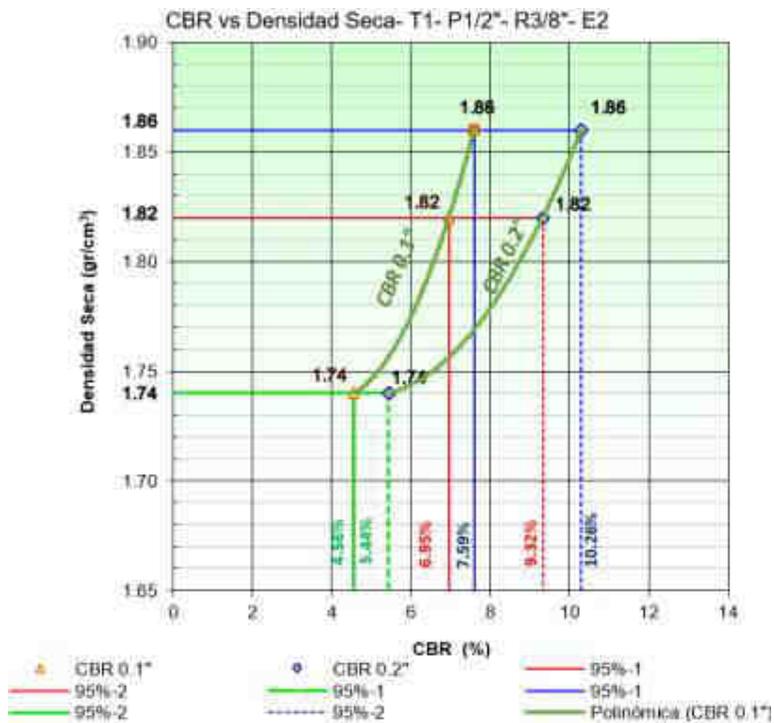


Figura 61: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/2''- Retenido 3/8'' Ensayo N°2

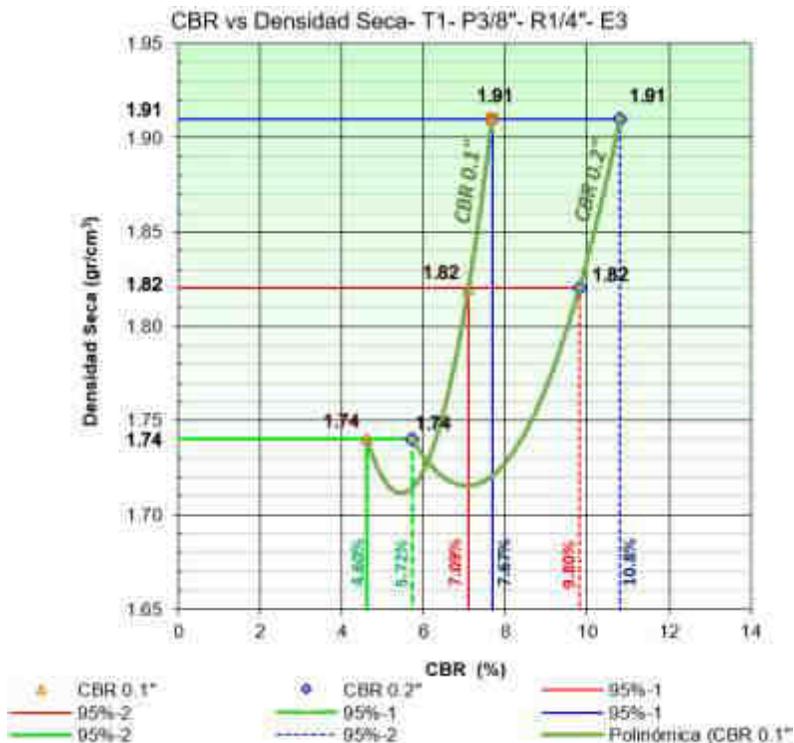


Figura 62: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 3/8''- Retenido 1/4'' Ensayo N°3

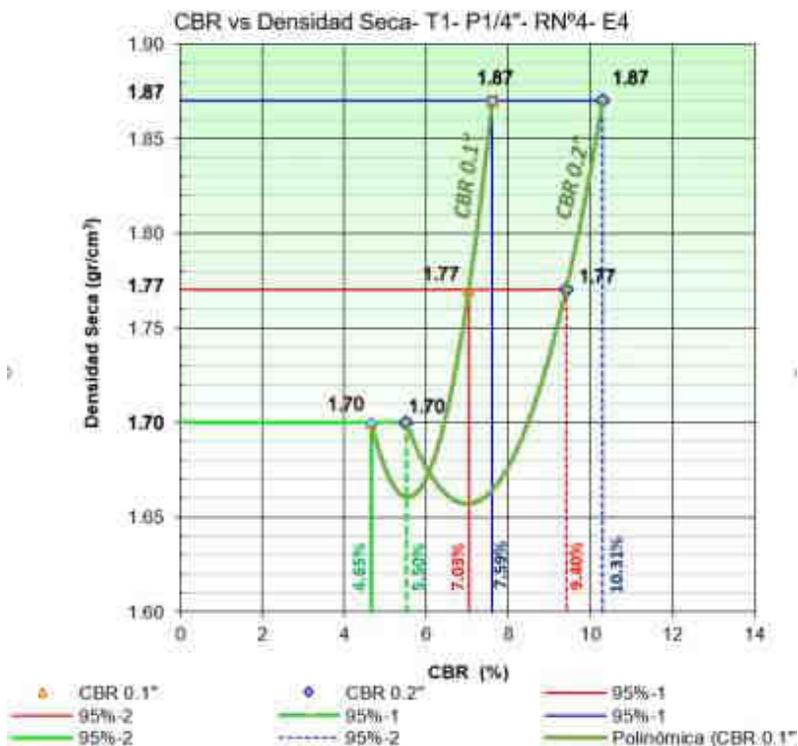


Figura 63: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/4''- Retenido N°4 Ensayo N°4

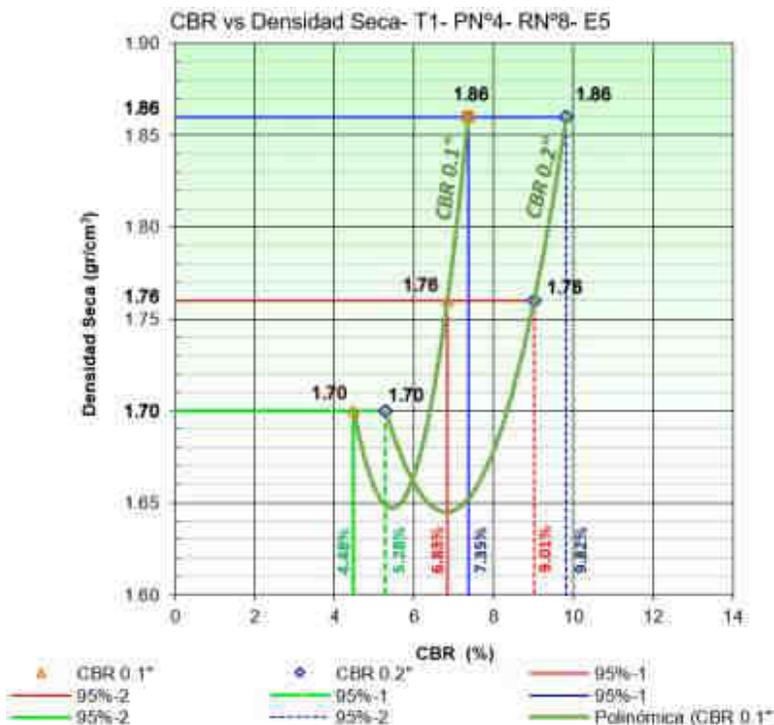


Figura 64: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante N°4- Retenido N°8 Ensayo N°5

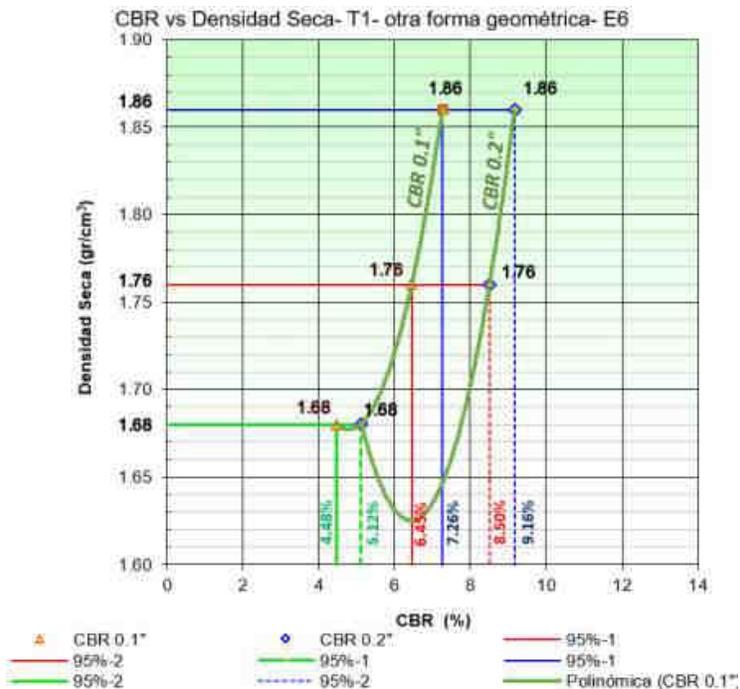


Figura 65: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- De otra forma geométrica- Ensayo N°6

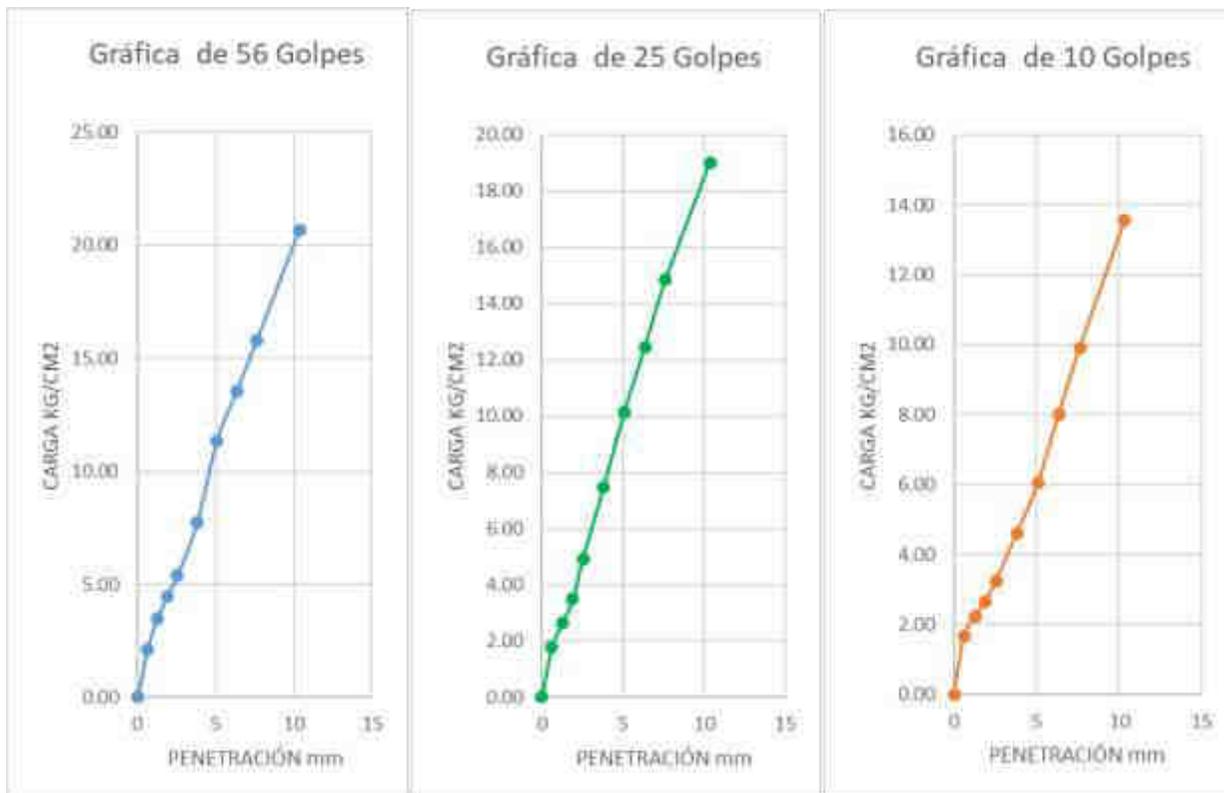


Figura 66: Grafica de penetración vs carga- Tramo 1- Pasante 3/8"- Retenido 1/4"- Ensayo N°3



Tabla 98: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS

CBR	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5		Ensayo 6	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% MDS	7.43%	9.30%	7.59%	10.30%	7.67%	10.80%	7.60%	10.30%	7.35%	9.82%	7.26%	9.16%
95% MDS	6.65%	8.70%	6.65%	9.32%	7.09%	9.80%	7.03%	9.40%	6.83%	9.00%	6.45%	8.50%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 82 se resume los 5 ensayos realizados a diferentes intervalos de dimensión de tereftalato de polietileno, obteniendo resultados de CBR para cada ensayo.

Como se observa en la imagen para el análisis de los polímeros las dimensiones óptimas para usar como aditivo se encuentra en el rango de 5 hasta los 10 mm (pasante la malla 3/8" y retenido la malla N°4").

Tabla 99: Dimensiones adecuadas del tereftalato de polietileno

ENSAYO	POLÍMERO A UTILIZAR		DIMENSIÓN		CBR	%INCRE
	PASANTE	RETENIDO	mm	mm		
SUELO NATURAL	-	-	-	-	5.76%	
ENSAYO N°1	3/4"	1/2"	19.1-12.7	12.7	6.65%	15.38%
ENSAYO N°2	1/2"	3/8"	12.7-9.5	9.525	6.94%	20.42%
ENSAYO N°3	3/8"	1/4"	9.5-6.4	6.35	7.09%	23.02%
ENSAYO N°4	1/4"	N°4	6.4-4.8	4.763	7.03%	21.98%
ENSAYO N°5	N°4	N°8	4.8-2.4	2.36	6.80%	17.99%

Fuente: Elaboración propia



Figura 67: Relación del valor de CBR con las dimensiones del Tereftalato de polietileno



Según el rango de dimensiones de los tamices en análisis granulométrico, los suelos con grava se presentan en el rango de 4.75mm hasta los 75mm, en el caso del tereftalato de polietileno las dimensiones óptimas para usar como aditivo se encuentran en el rango de 5mm hasta los 10mm (pasante la malla 3/8" y retenido en la N°4).

## a.2) Determinación del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno

### a.2.1) Determinación del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno- tramo 1

Una vez determinado el material de polímero óptimo a utilizar se tuvo que determinar el porcentaje de aditivo con el objetivo de obtener una máxima capacidad de soporte expresada en términos de CBR. En la tabla 81 se muestra el resumen de los 4 ensayos realizados, variando el contenido de polímeros con 0.5%, 1%, 1.5% y 2% respecto al peso seco del suelo.

Tabla 100: Resultados de CBR al 95% DMS con diferentes % del tereftalato (PR)- Tramo 1

N°			Ensayo N°1			Ensayo N°2			Ensayo N°3			Ensayo N°4		
			0.5% del PSS			1.0% del PSS			1.5% del PSS			2.0% del PSS		
N° Golpes			56	25	10	56	25	10	56	25	10	56	25	10
P.E Seco	g/c m3		1.89	1.78	1.72	1.87	1.77	1.70	1.85	1.75	1.68	1.83	1.73	1.66
Expansión	%		1.24	1.70	2.06	1.22	1.68	2.14	1.1	1.58	1.96	1	1.48	1.82
Absorción	%		2.84	3.43	6.71	2.34	3.64	5.96	2.52	3.30	6.27	2.39	3.48	6.45
Esfuerzo de penetración	0.1"	Kg/cm2	4.94	4.48	2.99	5.35	4.83	3.22	5.52	5.00	3.27	5.29	4.77	3.16
	0.2"		9.91	8.81	5.23	10.84	9.68	5.75	11.25	10.03	5.93	10.67	9.51	5.64
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/cm2	4.94	4.48	2.99	5.35	4.83	3.22	5.52	5.00	3.27	5.29	4.77	3.16
	0.2"		9.91	8.81	5.23	10.84	9.68	5.75	11.25	10.03	5.93	10.67	9.51	5.64
Valor de CBR	0.1"	%	7.02%	6.36%	4.24%	7.59%	6.85%	4.56%	7.84%	7.10%	4.65%	7.51%	6.77%	4.48%
	0.2"		9.38%	8.34%	4.95%	10.26%	9.16%	5.44%	10.64%	9.49%	5.61%	10.09%	9.00%	5.33%

Fuente: Elaboración propia

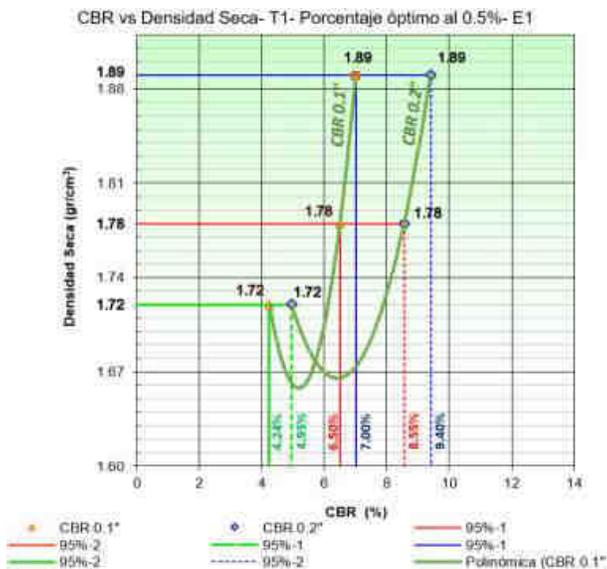


Figura 68: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1

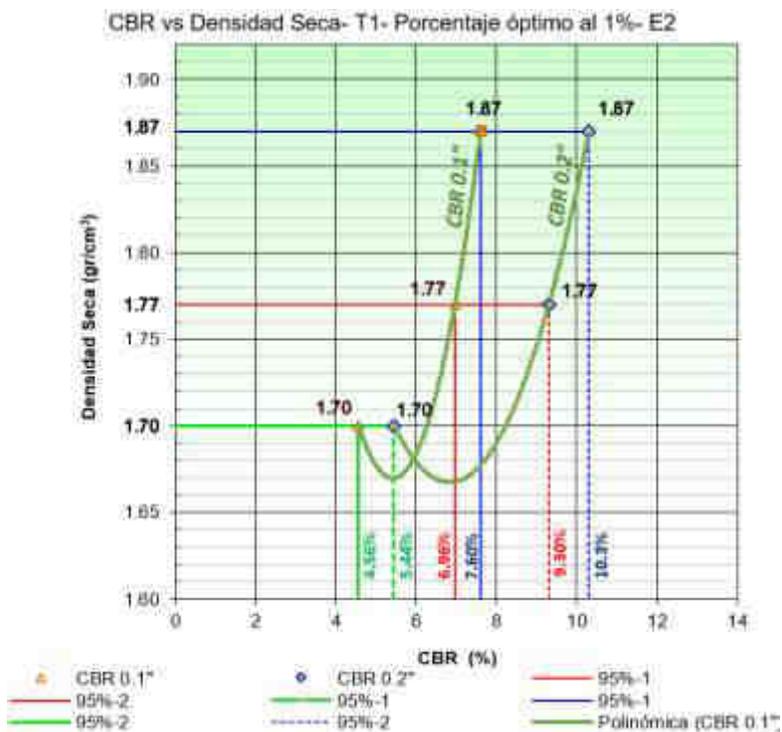


Figura 69: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2

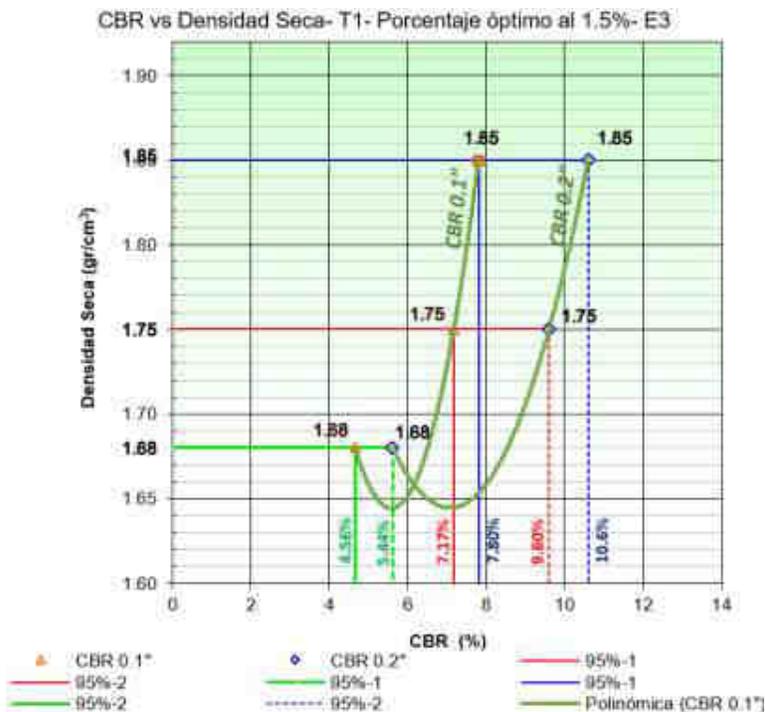


Figura 70: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3

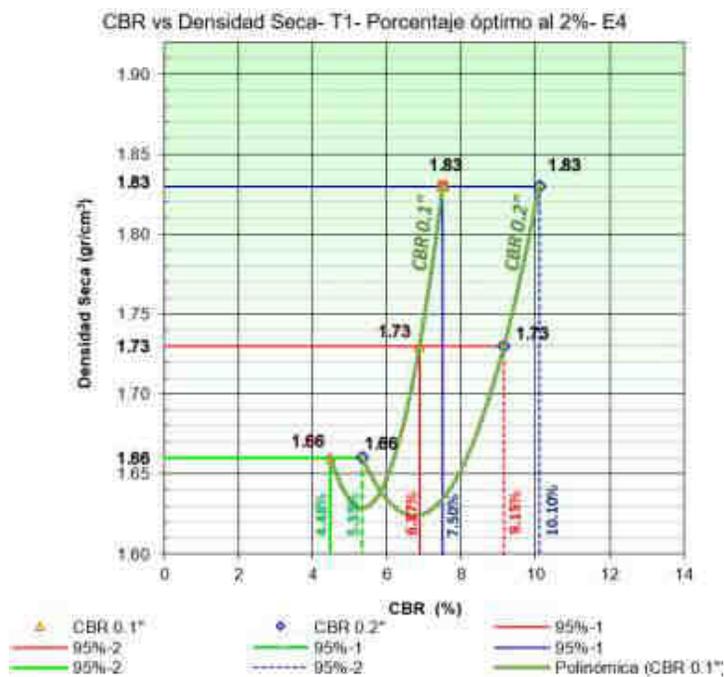


Figura 71: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4

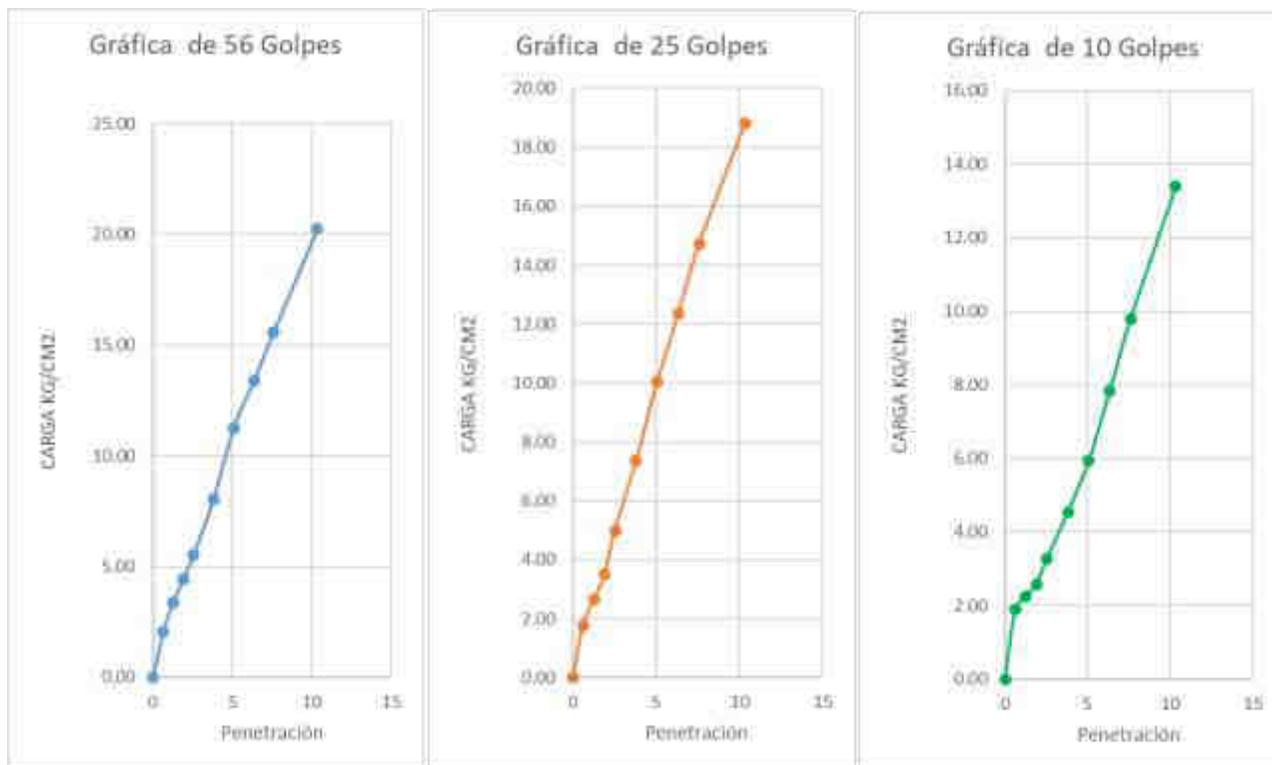


Figura 72: Grafica de penetración vs carga- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3

Tabla 101: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- con variación de los porcentajes de tereftalato de polietileno- Tramo 1

CBR	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% MDS	7.0%	9.4%	7.6%	10.3%	7.8%	10.6%	7.5%	10.10%
95% MDS	6.50%	8.55%	6.96%	9.30%	7.17%	9.60%	6.87%	9.15%

Fuente: Elaboración propia

b) Análisis de la prueba

Se determinó los análisis respectivos de CBR para cada prueba a un porcentaje determinado. Se realizaron los 4 ensayos respectivos para cada porcentaje los cuales son al 0.5%, 1%, 1.5% y 2%. En cada prueba tuvimos resultados favorables, pero, el más óptimo fue de 1.5% con respecto al peso seco del suelo.



Tabla 102: Determinación del % adecuado- Tramo 1

% DE POLIMERO	CBR	% INCREMENTO
0.00%	5.76%	
0.50%	6.50%	12.78%
1.00%	6.96%	20.76%
1.50%	7.17%	24.41%
2.00%	6.87%	19.20%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 83 se muestra el resumen del CBR del suelo al 95% DMS y se determinó el aumento porcentual con respecto al suelo sin tereftalato de polietileno. En la figura 47 se aprecia que el porcentaje adecuado para la estabilización de suelos con tereftalato de polietileno es de 1.5% con respecto al peso seco del suelo.

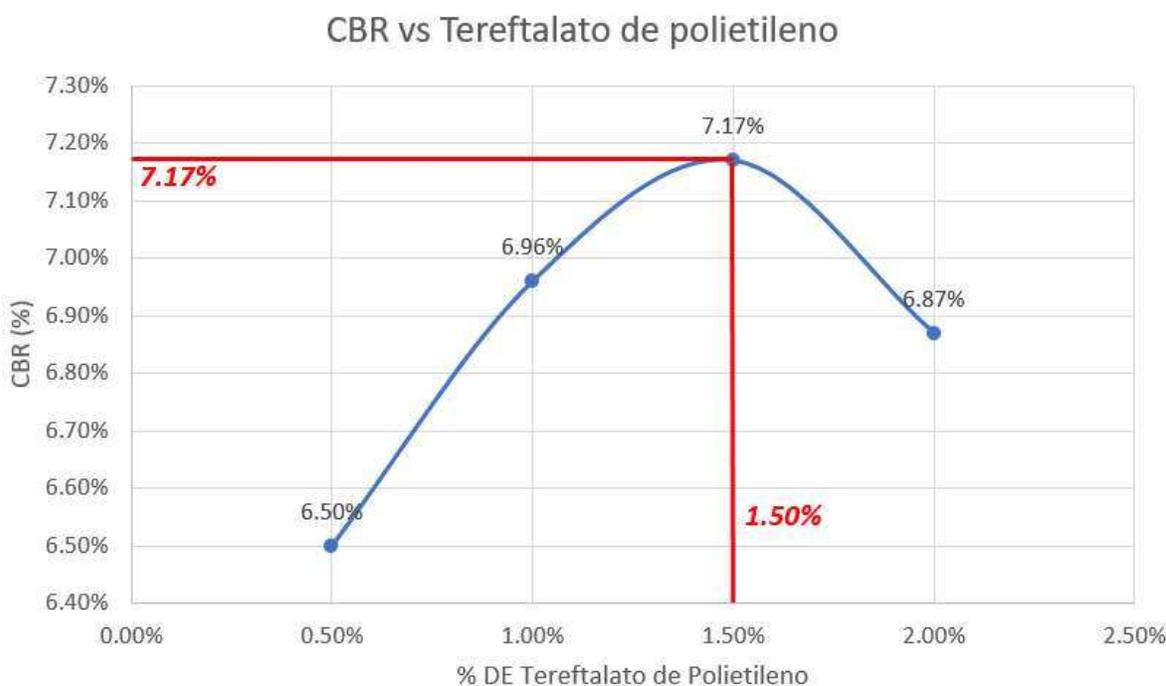


Figura 73: Relación del valor de CBR con el % adecuado de polímeros- tramo 1

### a.2.1) Determinación del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno- tramo 2

Para el segundo tramo se utilizó el tereftalato de polietileno con una variación de dimensión entre los 5 y 10 mm. En la tabla 33 se muestra el resumen de los 4 ensayos realizados, variando el contenido de polímeros con 0.5%, 1%, 1.5% y 2% respecto al peso seco del suelo.



Tabla 103: Resultados de CBR al 95% DMS con diferentes % de tereftalato de polietileno – Tramo 2

N°	Golpes	P.E Seco	Ensayo N°1			Ensayo N°2			Ensayo N°3			Ensayo N°4		
			0.5% del PSS			1.0% del PSS			1.5% del PSS			2.0% del PSS		
		g/c m3	56	25	10	56	25	10	56	25	10	56	25	10
		%	1.93	1.83	1.75	1.91	1.81	1.74	1.85	1.75	1.68	1.89	1.78	1.71
		%	1.64	2.26	2.50	1.60	2.22	2.54	1.64	2.24	2.52	1.70	2.38	2.60
		%	4.03	6.83	11.53	3.17	5.12	9.91	3.36	5.62	10.10	3.30	4.88	8.95
		Kg/cm2	3.33	3.10	2.24	3.62	3.27	2.41	3.73	3.39	2.47	3.50	3.22	2.35
		Kg/cm2	6.10	5.46	3.50	6.10	5.93	3.73	6.91	6.16	3.91	6.39	5.75	3.62
		Kg/cm2	3.33	3.10	2.24	3.62	3.27	2.41	3.73	3.39	2.47	3.50	3.22	2.35
		Kg/cm2	6.10	5.46	3.50	6.10	5.93	3.73	6.91	6.16	3.91	6.39	5.75	3.62
		%	4.73	4.40	3.17	5.14	4.65	3.42	5.30	4.81	3.50	4.97	4.56	3.34
		%	5.77	5.17	3.32	5.77	5.61	3.53	6.54	5.83	3.70	6.04	5.44	3.42

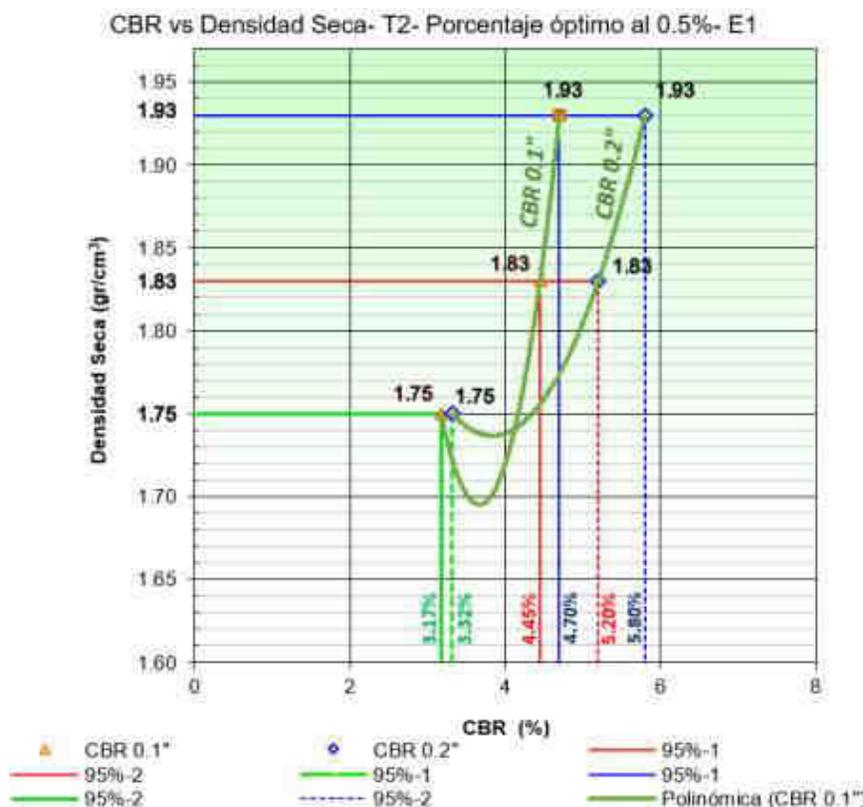


Figura 74: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1

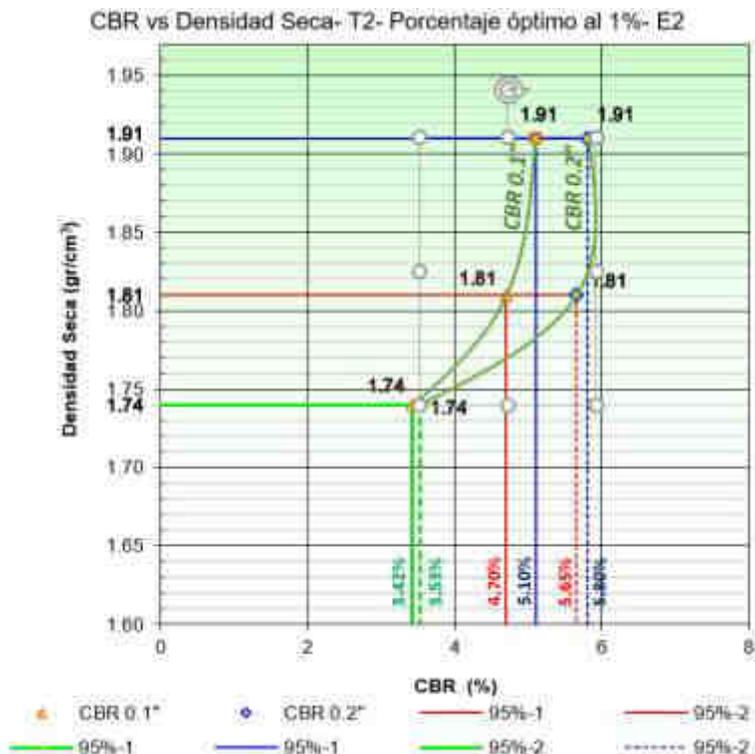


Figura 75: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2

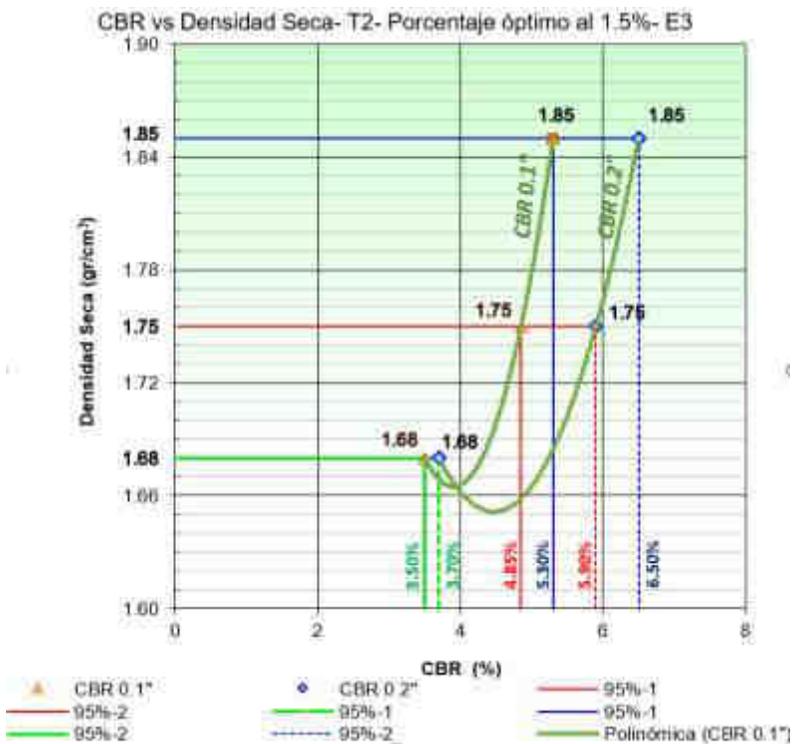


Figura 76: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3

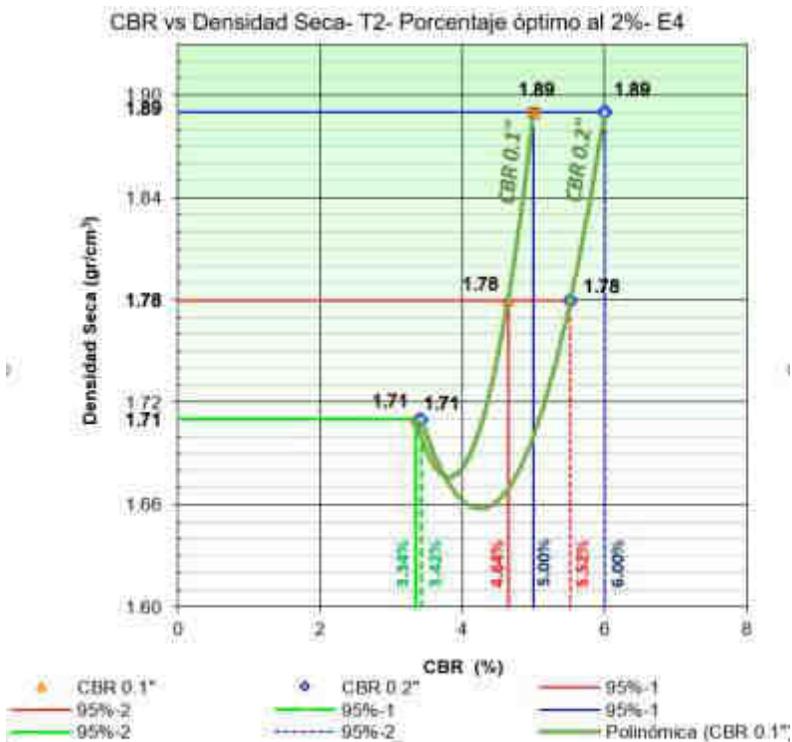


Figura 77: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4

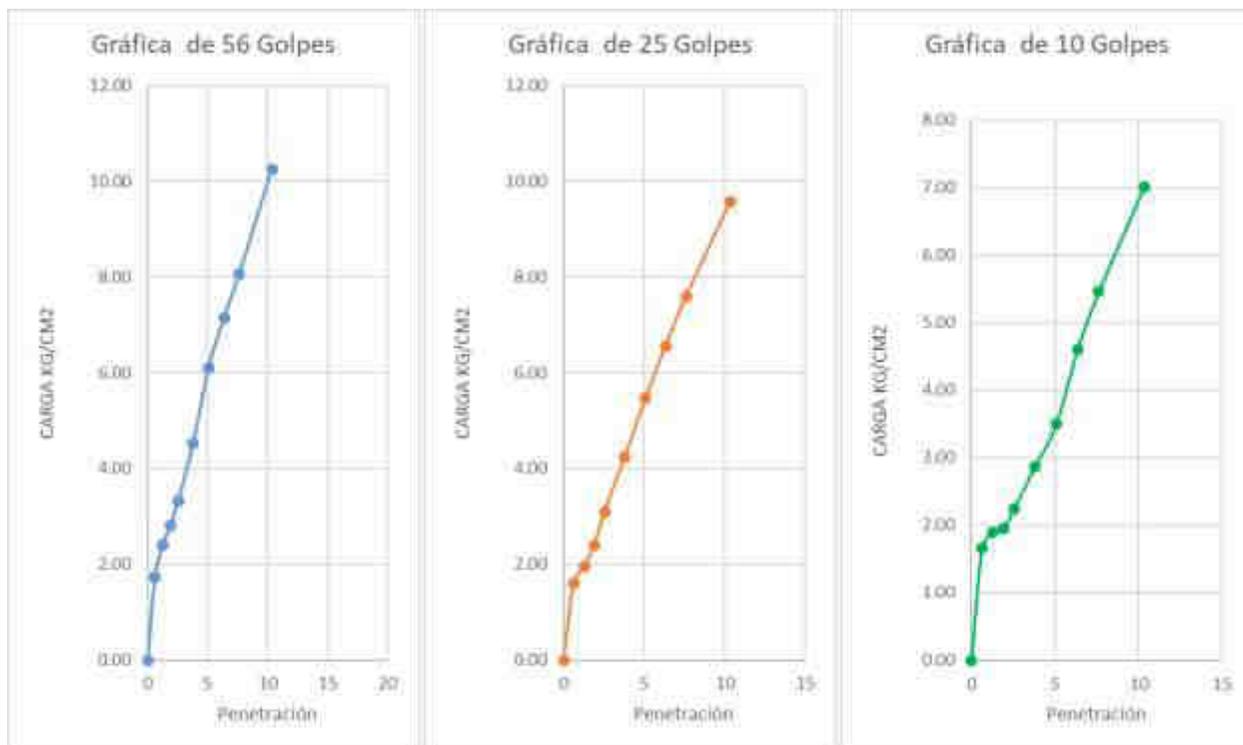


Figura 78: Gráfica de penetración vs carga- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3



En la figura 46 (a, b, c, d) se determina el valor del CBR al 95% de la densidad máxima seca para cada ensayo realizado. En la tabla 82 se muestra el resumen del ensayo con la variación del porcentaje de polímeros.

*Tabla 104: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- Tramo 2*

CBR	ENSAYO 1		ENSAYO 2		ENSAYO 3		ENSAYO 4	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% DMS	4.70%	5.80%	5.10%	5.80%	5.30%	6.50%	5%	6%
95% DMS	4.45%	5.20%	4.70%	5.65%	4.85%	5.90%	4.64%	5.52%

Se realizaron los 4 ensayos respectivos para cada porcentaje los cuales son al 0.5%, 1%, 1.5% y 2%. En cada prueba tuvimos resultados favorables, pero, el más óptimo fue de 1.5% con respecto al peso seco del suelo.

*Tabla 105: Determinación del % adecuado- Tramo 2*

% DE POLIMERO	CBR	% INCREMENTO
0.00%	3.77%	
0.50%	4.45%	18.04%
1.00%	4.70%	24.67%
1.50%	4.85%	28.65%
2.00%	4.64%	23.08%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 83 se muestra el resumen del CBR del suelo al 95% DMS y se determinó el aumento porcentual con respecto al suelo sin tereftalato de polietileno.

En la figura 47 se aprecia que el porcentaje adecuado para la estabilización de suelos con tereftalato de polietileno es de 1.49% con respecto al peso seco del suelo.

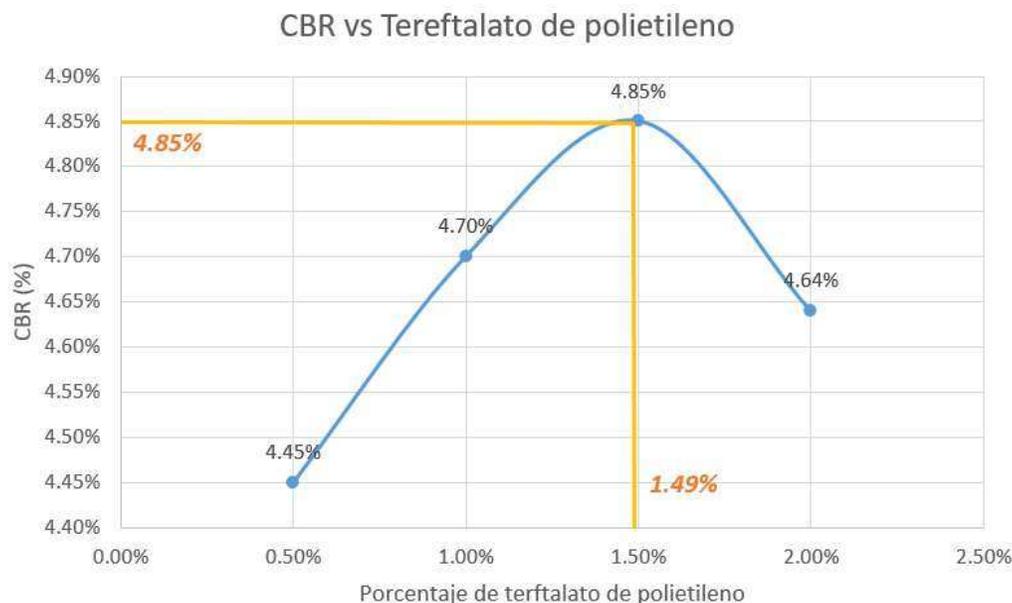


Figura 79: Relación del valor de CBR con el % adecuado de tereftalato de polietileno- Tramo 2

En el segundo tramo con la adición de polímeros reciclados, incrementa porcentualmente la resistencia en un 28.6%, obteniendo así un valor de CBR de 4.85%, pero este valor aun es relativamente bajo pues es menor del valor que exige la normativa del MTC, menciona que los materiales aptos para la coronación de la subrasante son suelos con CBR igual o mayor de 6%.

Razón por la cual se tiene que buscar otro método ya investigado y normado por el MTC, según las características del suelo de subrasante, el que más se adapta es la estabilización suelo-cal, razón por la cual se eligió este tipo de estabilizador para poder comparar los resultados de ambos métodos.

### 3.6.3. Determinación de la dosificación y uso adecuado de la cal

#### 3.6.3.1. Determinación del porcentaje óptimo de cal mediante el uso de los límites de Atterberg.

- a) El procedimiento es el mismo que para los límites de Atterberg comunes utilizando las normas AASHTO T-89 para límite líquido y AASHTO T-90 para límite de plasticidad e índice de plasticidad, con el único cambio de agregar la cal en distintos porcentajes.
- b) Calculo de porcentaje óptimo para la Cal.



Tabla 106: Determinación del % adecuado de cal

Variación de IP en mezclas de suelo Cal				
Nº de muestra	% cal	Valor de límite líquido	Valor de límite de plasticidad	Valor de IP
1	2.5%	32.1	23.9	8.1
2	3.5%	31.3	27	4.30
3	4.5%	31	29.27	1.73
4	5.5%	30.8	NP	NP

### C) Análisis de la prueba

Se realizaron 4 ensayos respectivos para sacar el valor óptimo de cal que estabiliza el suelo, será aquel cuyo valor de IP tienda a cero, los resultados siguientes corresponden al suelo analizado en esta investigación, por consiguiente, se obtuvo con 5.5% un valor de IP óptimo.

#### 3.6.3.2. Determinación del ensayo proctor suelo más cal.

Para graficar la curva de compactación, se determinó los contenidos de humedad y densidades secas de los especímenes compactados, como se muestra a continuación:

Tabla 107: Ensayos suelo más cal al 5.5%

Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del suelo + molde (gr)	3622	3712	3748	3728	3685
Peso del molde (gr)	1787	1787	1787	1787	1787
Peso de la muestra húmeda (gr)	1835	1957	2013	2027	2029
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	944	944	944	944	944
Densidad húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.944	2.039	2.077	2.056	2.011
Recipiente N°	R-1	R-2	R-3	R-4	R-5
Peso muestra húmeda + tara (gr)	230.10	187.60	295.10	266.70	385.40
Peso muestra seca + tara (gr)	215.1	175.1	267.8	241.1	342.6
Peso del agua (gr)	15	12.5	27.3	25.6	42.8
Peso de la tara (gr)	67	68	60	61	62
Peso de la muestra seca (gr)	148.1	107.1	207.8	180.1	280.6
Contenido de humedad (%)	10.10%	11.70%	13.10%	14.20%	15.30%
Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.765	1.826	1.836	1.8	1.745
DMS (gr/cm <sup>3</sup> ):	1.8390				
CHO (%):	12.90%				



Se determinó la relación del contenido de humedad y el peso específico seco obteniendo la curva de compactación del suelo, con el objetivo de determinar la densidad seca máxima para un contenido de humedad óptimo. En la figura 16 se muestra la relación del contenido de humedad y la densidad seca del material del segundo tramo adicionado con cal al 5.5%.

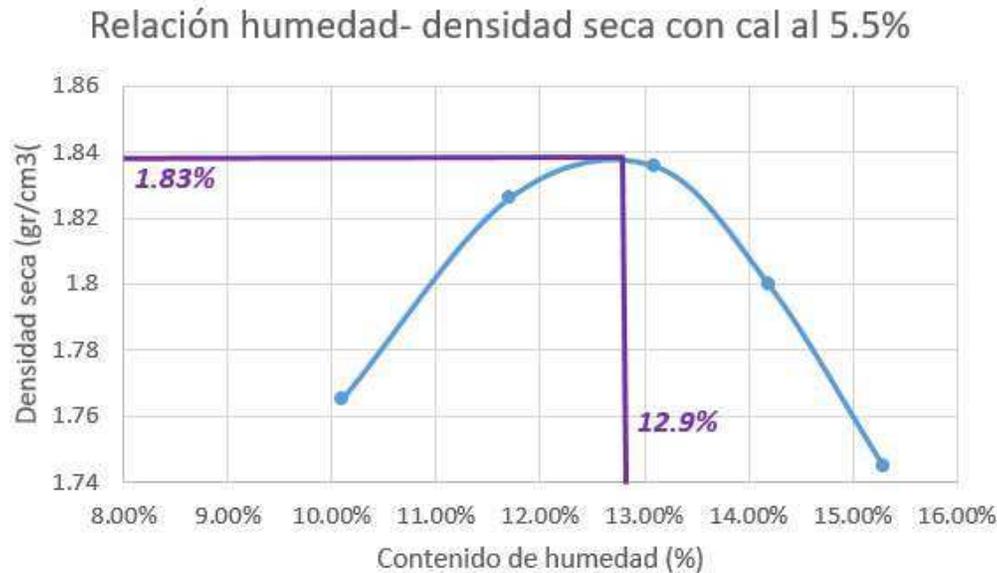


Figura 80: Relación Humedad densidad al 5.5% de cal.

### 3.6.3.3. Determinación del CBR con la adición de cal

#### a) Cálculo del CBR con cal del tramo 2:

Habiendo realizado los ensayos de CBR con el tereftalato de polietileno, se observó que en el primer tramo incremento la capacidad de soporte en 7.17%, el cual es un valor >6%, pero en el segundo tramo se observó que la capacidad de soporte fue de 4.85%, el cual es un valor <6%, por tal motivo se tiene que buscar otro método para poder estabilizar el suelo, como lo mencionado anteriormente se optó por aplicar la estabilización suelo- cal solo al segundo tramo por ser un suelo con gran cantidad de arcilla y ser plástico.

La cal se utilizó en una dosificación del 5.5% con respecto al peso seco del suelo, este porcentaje se obtuvo de los límites de Atterberg.



Tabla 90: Resultados de CBR suelo- cal al 5.5%

N° Golpes			Ensayo N°1		
			56	25	12
P.E Seco	g/cm <sup>3</sup>		1.873	1.773	1.703
Expansion	%		0.64	0.88	1.12
Absorcion	%		0.95	1.26	1.85
Esfuerzo de penetracion	0.1"	Kg/cm <sup>2</sup>	13.04	10.90	7.54
	0.2"		24.10	18.10	10.67
Esfuerzo Corregido	0.1"	Kg/cm <sup>2</sup>	14.32	11.72	7.54
	0.2"		24.64	18.52	10.67
Valor de CBR	0.1"	%	20.32%	16.64%	10.09%
	0.2"		23.32%	17.53%	10.71%

Tabla 108: Resultados de proctor suelo- cal.

Resultados	DMS: 1.839 g/cm <sup>3</sup>
	CHO: 12.90%

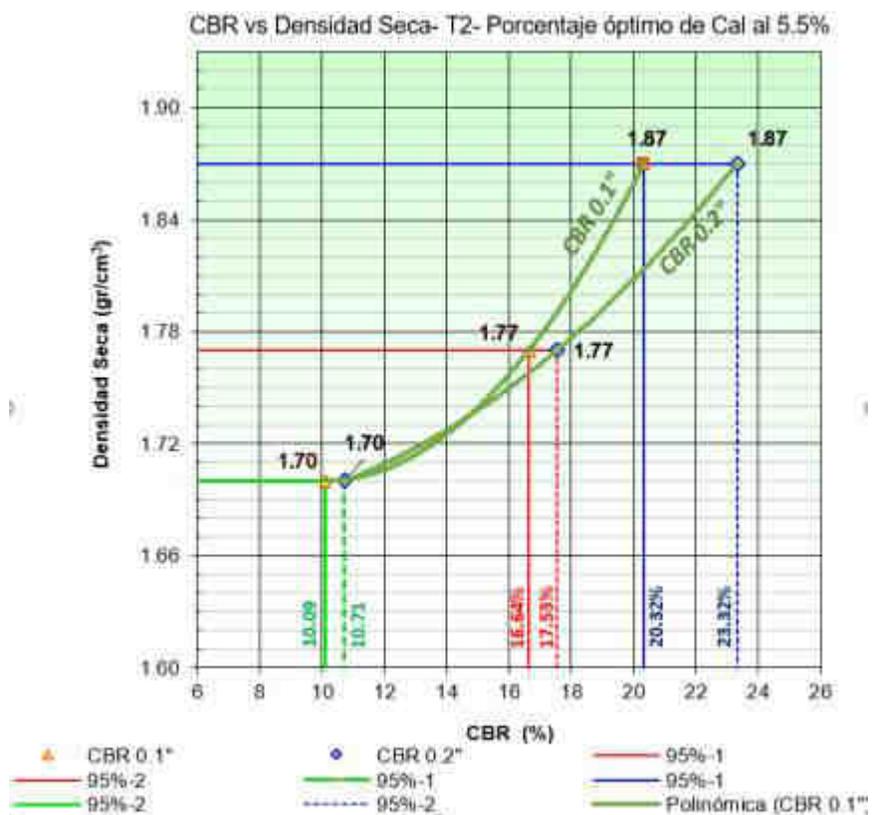


Figura 81: CBR vs Densidad seca- Tramo 2- Porcentaje óptimo de Cal al 5.5%

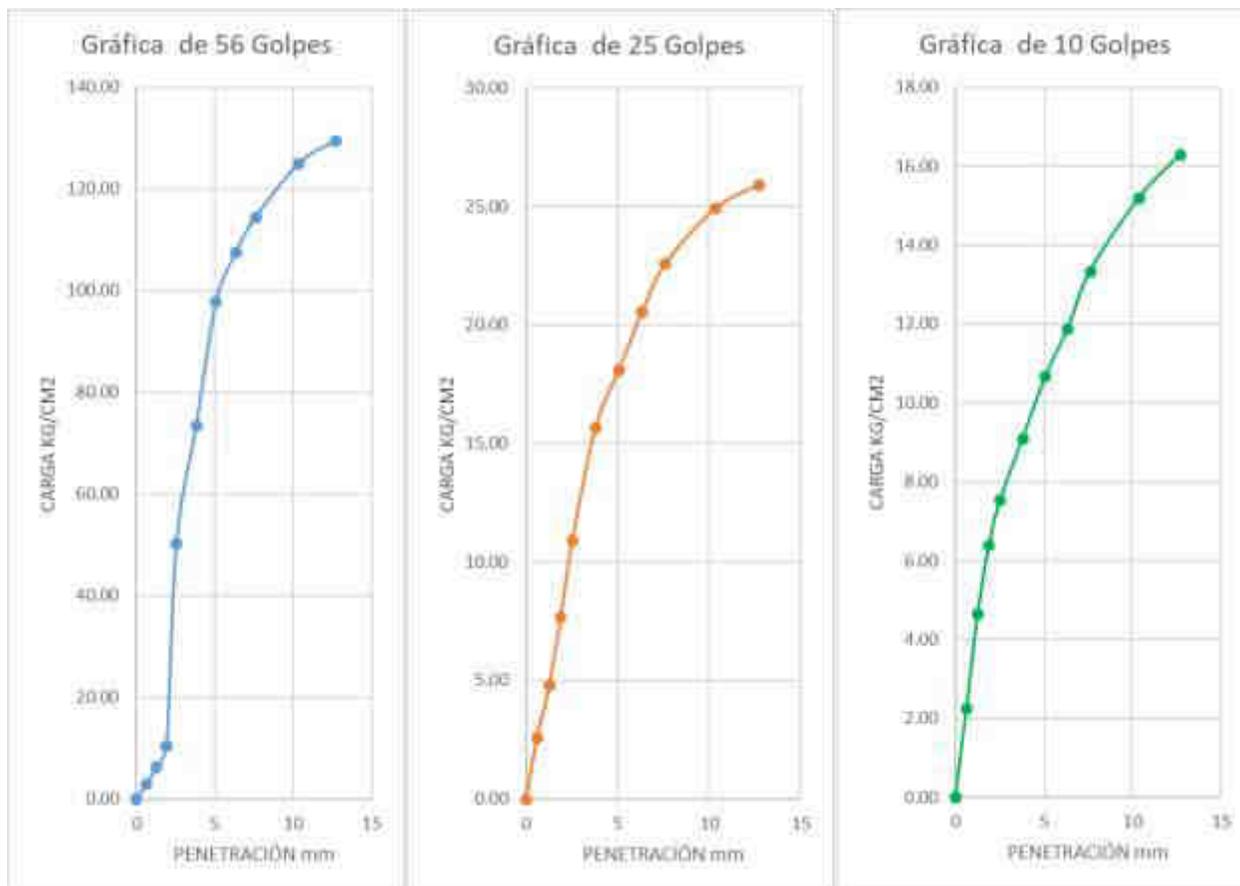


Figura 82: Grafica de penetración vs carga- Tramo 2- Porcentaje óptimo de Cal al 5.5%

b) Análisis de la prueba

Con la adición de la cal se obtiene un incremento de 350% de la capacidad de soporte expresado en valor de CBR. En la tabla 78 se presenta el resumen de resultados de CBR del ensayo realizado con la adición de la cal.

Tabla 109: CBR suelo- cal al 95% DMS

CBR	0.1"	0.2"
100% MDS	20.30%	23.30%
95% MDS	16.89%	18.00%



## 4. Capítulo IV: Resultados

Obtención de las propiedades física mecánicas del suelo:

### 4.1. Contenido de humedad:

En promedio el contenido de humedad de la subrasante de la trocha carrozable es de 21.13%.

Tabla 110: Resumen del contenido de humedad

Contenido de humedad			
Calicata	Profundidad (m)	Tramo	W%
C1	0.4-1.50	Tramo 1	22.10%
C2	0.35-1.50		23.80%
C3	0.40-1.50	Tramo 2	19.70%
C4	0.20-1.50		18.90%

Fuente: Elaboración propia

### 4.2. Análisis granulométrico por tamizado:

El ensayo de análisis granulométrico permitió clasificar los suelos, y apreciar las distribuciones granulométricas del suelo.

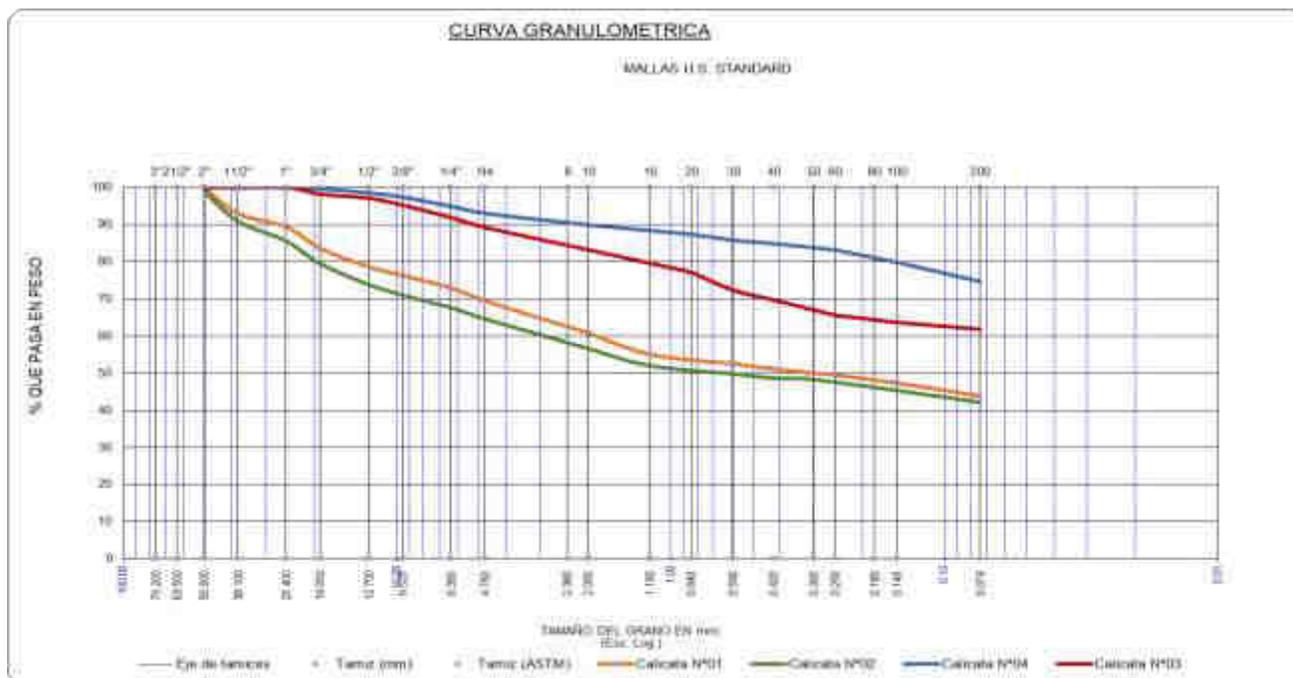
Tabla 111: Contenido del porcentaje por material

Malla		%PASANTE			
Tamiz	mm	C1	C2	C3	C4
3"	76.2	100.0%	100%	100%	100%
2"	50.8	100.0%	99%	100%	100%
1 1/2"	38.1	93%	90.80%	100%	100%
1"	25.4	89.40%	85.50%	100%	100%
3/4"	19.05	83.60%	79.40%	100%	99.60%
1/2"	12.7	78.60%	73.80%	100%	98.50%
3/8"	9.525	76.30%	70.90%	99.60%	97.40%
1/4"	6.35	73%	67.60%	97%	94.90%
N°4	4.763	69.40%	64.50%	96%	93%
N°10	2	60.80%	56.50%	93.10%	89.90%
N°20	0.84	55%	51.90%	91.40%	87.30%
N°30	0.59	52.50%	49.70%	90.10%	85.80%
N°40	0.426	51.10%	48.60%	89.10%	84.80%
N°60	0.25	49.50%	47.20%	87.30%	83.10%
N°100	0.149	47.30%	45.20%	83.90%	79.80%
N°200	0.074	43.80%	42.10%	78.50%	74.60%

Fuente: Elaboración propia



Figura 82-b Curva granulométrica



Fuente: Elaboración propia

Se aprecia de la tabla 100, que en el primer tramo cuyas muestras son la calicata 1 y calicata 2, que en promedio el 43% pasa la malla N°200 y en el segundo tramo el material fino es de 76% indicando la gran presencia de material arcillosos, en la tabla 101 se muestra el porcentaje de material correspondiente a grava, arena, limo y arcilla.

Tabla 112: Contenido del porcentaje por material

Material	C1	C2	C3	C4
	TRAMO 1		TRAMO 2	
Grava	39.20%	43.50%	6.90%	10.10%
Arena	17.00%	14.40%	14.60%	15.30%
Limo y Arcilla	43.80%	42.10%	78.50%	74.60%

Fuente: elaboración propia

#### 4.3. Determinación de la gravedad específica:

Tabla 113: Resultados de la gravedad específica

Calicata	Profundidad	Tramo	GE
C1	0.4-1.50	Tramo 1	2.742
C3	0.4-1.50	Tramo 2	2.780



Fuente: elaboración propia

#### 4.4. Determinación de límite líquido, límite plástico e IP:

Se puede observar que en el primer tramo en promedio el índice de plasticidad es menor a 10% y en el segundo tramo el índice de plasticidad es mayor al 10%.

Tabla 114: Características plásticas del suelo.

Calicata	Muestra	LL	LP	IP
C1	M-2	30.97%	22.74%	8.23%
C2	M-2	30.40%	23.27%	7.10%
C3	M-2	32.50%	17.20%	15.40%
C4	M-2	31.05%	17.98%	13.07%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. Clasificación SUCS y AASHTO

Para la clasificación SUCS se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes la malla N°4, N°200 y las características plásticas.

Para la clasificación AASHTO se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes la malla No 10, No 40, No 200; las características plásticas y el índice de grupo.

Tabla 115: Resultados de la Clasificación de suelos

Calicata	Muestra	Tramo	SUCS	AASHTO
C1	M-2	T1	CL (arcilla ligera y tipo grava con arena)	A-4 (1)
C2	M-2		CL (arcilla ligera y tipo grava con arena)	A-4 (0)
C3	M-2	T2	CL (Arcilla ligera arenosa)	A-6 (12)
C4	M-2		CL (Arcilla ligera arenosa)	A-6 (8)

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6. Ensayo Proctor

Se determinó la relación del contenido de humedad y el peso específico seco obteniendo la curva de compactación del suelo, con el objetivo de determinar la densidad seca máxima para un contenido de humedad óptimo.

Tabla 116: Resultados de Proctor suelo natural

Calicata	Muestra	Tramo	MDS	OCH
C1	M-2	T1	1.91	11.50%
C2	M-2	T2	1.94	10.50%

Fuente: Elaboración propia

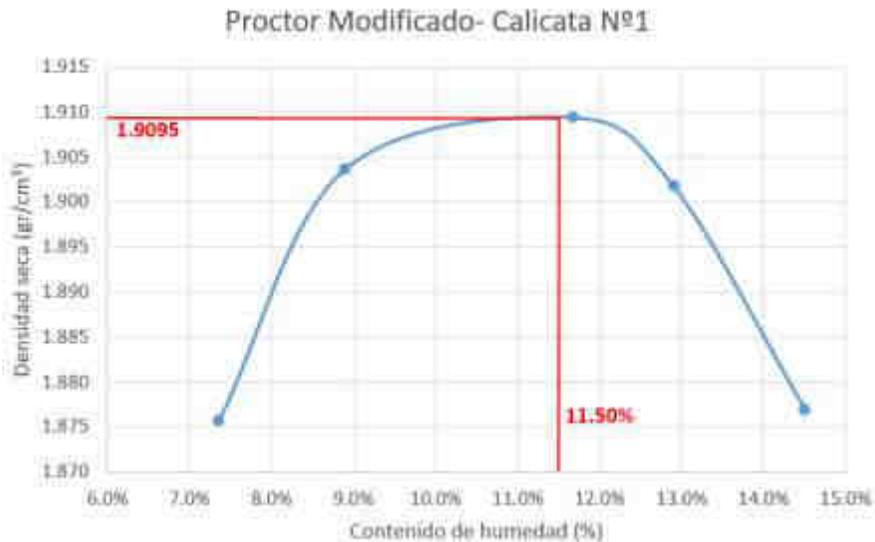


Figura 83: Curva de compactación- Calicata N°1

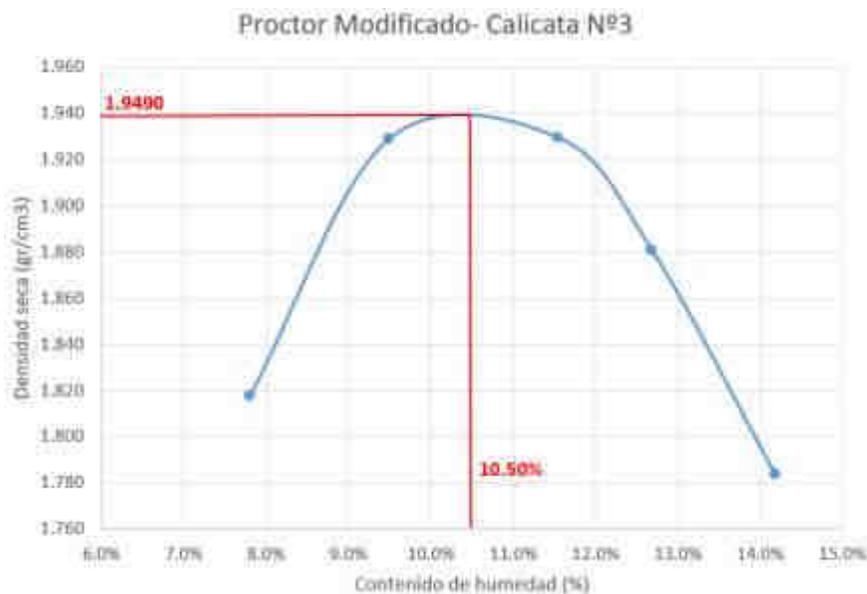


Figura 84: Curva de compactación- Calicata N°3

#### 4.7. Ensayo CBR:

Este ensayo es la más determinante e importante para la presente investigación. El ensayo de CBR se hizo para cada tramo, se evaluaron a la calicata más crítica como resultado del análisis granulométrico y las propiedades plásticas. En el primer tramo se seleccionó la calicata N°1 y en el segundo la calicata N°3.



#### 4.7.1. Ensayo CBR del suelo natural

##### 4.7.1.1. Calculo del CBR natural del primer tramo

Tabla 117: Promedio de CBR- Tramo 1- Calicata N°1

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
CBR	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% MDS	7.10%	9.20%	7.30%	9.40%	6.30%	8.30%	6.88%	9.00%
95% MDS	5.80%	7.85%	5.84%	8.20%	5.65%	8.10%	5.76%	8.05%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 118: Promedio de la expansión y absorción- tramo 1, calicata N°1

		Promedio		
N° Golpes		56	25	10
P.E.SECO	g/cm3	1.908	1.815	1.737
EXPANSION	%	2.553	3.44	4.187
ABSORCION	%	3.423	5.559	8.702

Fuente: Elaboración propia

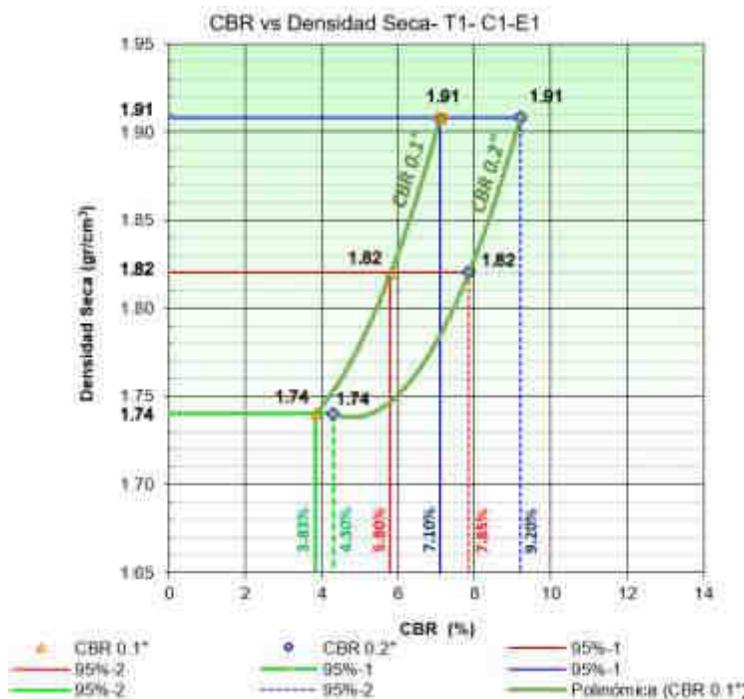


Figura 85: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°1

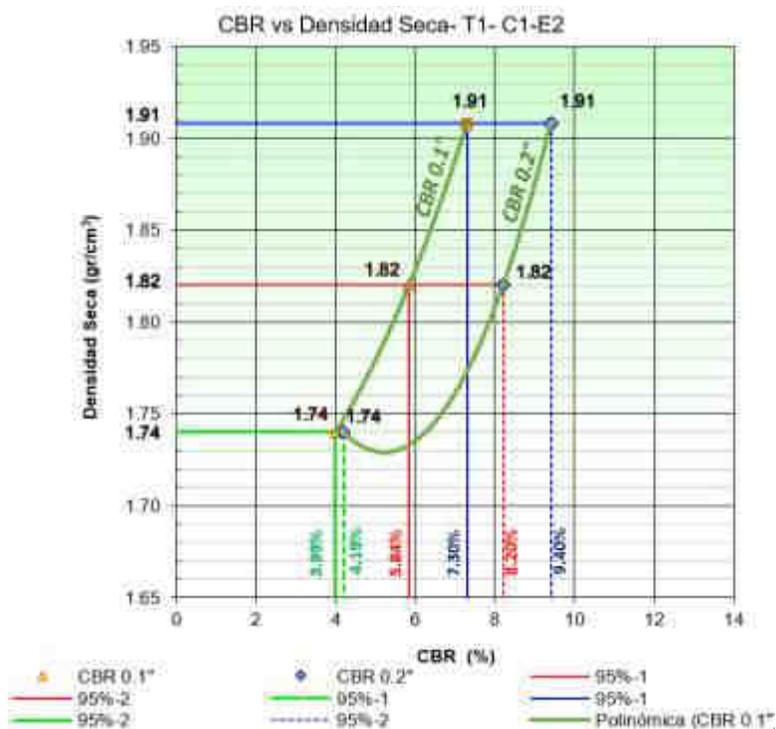


Figura 86: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°2

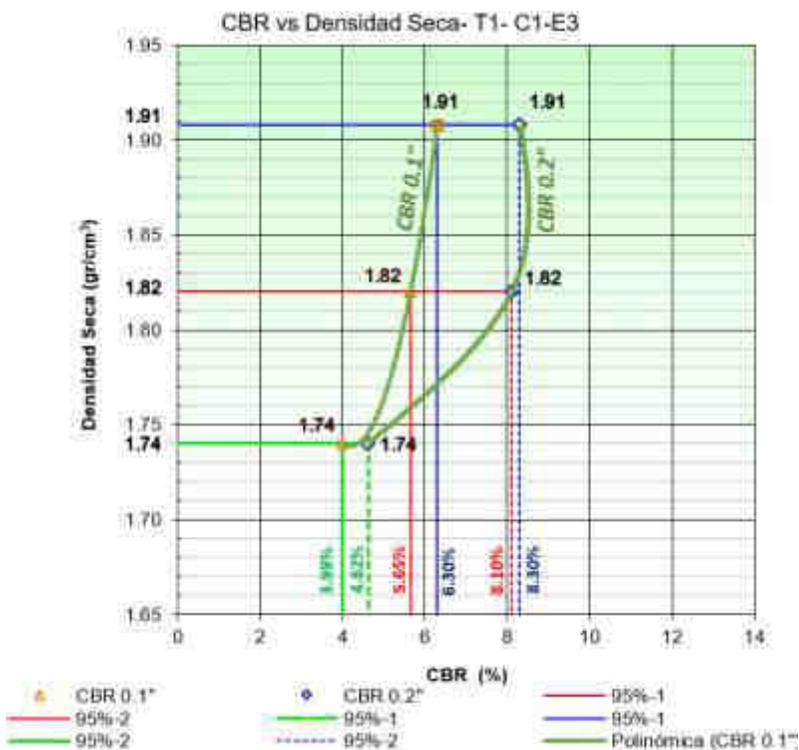


Figura 87: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Calicata N°1- Ensayo N°3



#### 4.7.1.2. Calculo del CBR natural del segundo tramo

Tabla 119: Promedio de CBR tramo 2, calicata N° 3

CBR	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Promedio	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% MDS	4.20%	5.00%	4.20%	4.90%	4.10%	4.80%	4.17%	4.91%
95% MDS	3.80%	4.55%	3.84%	4.65%	3.91%	4.63%	3.85%	4.61%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 120: Promedio de % de exp. y abs. Tramo 2, calicata N° 3

N° Golpes		Promedio		
		56	25	12
P.E.SECO	g/cm3	1.932	1.821	1.765
EXPANSION	%	3.207	4.493	4.907
ABSORCION	%	4.296	7.087	11.428

Fuente: Elaboración propia

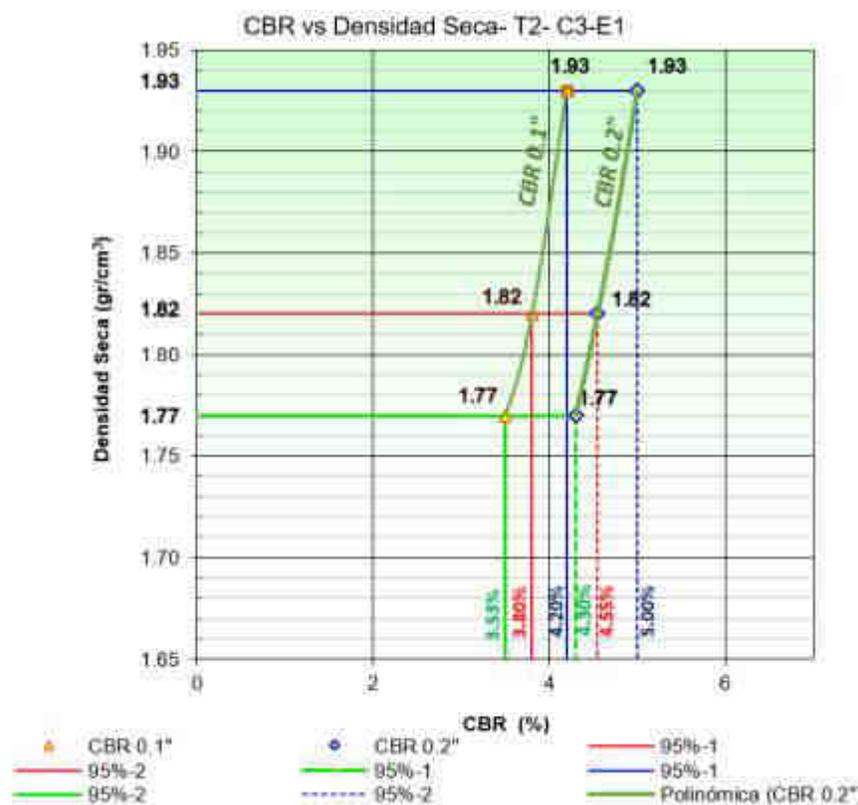


Figura 88: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°1

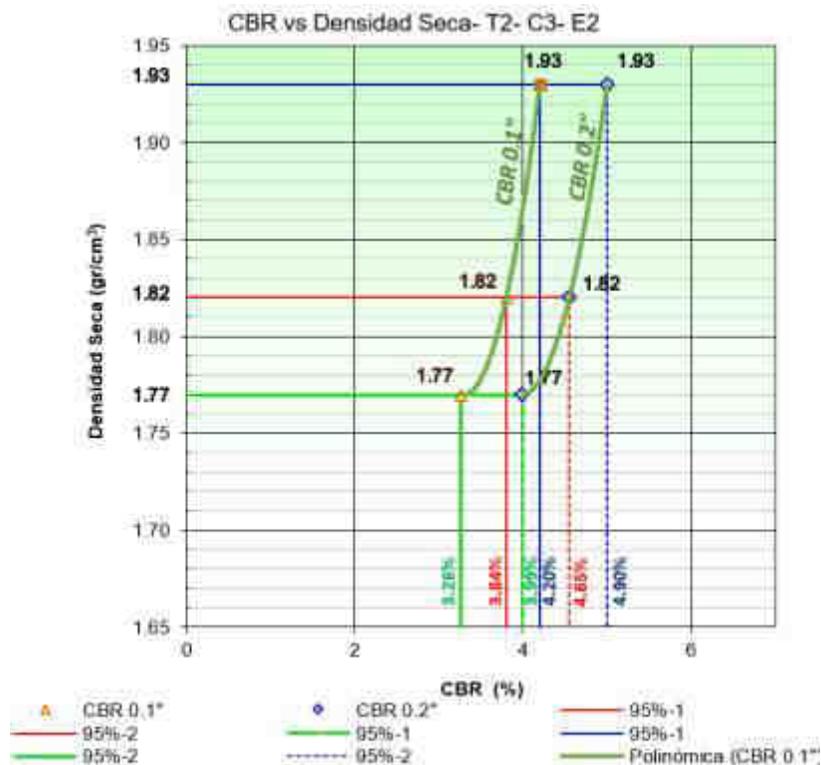


Figura 89: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°2

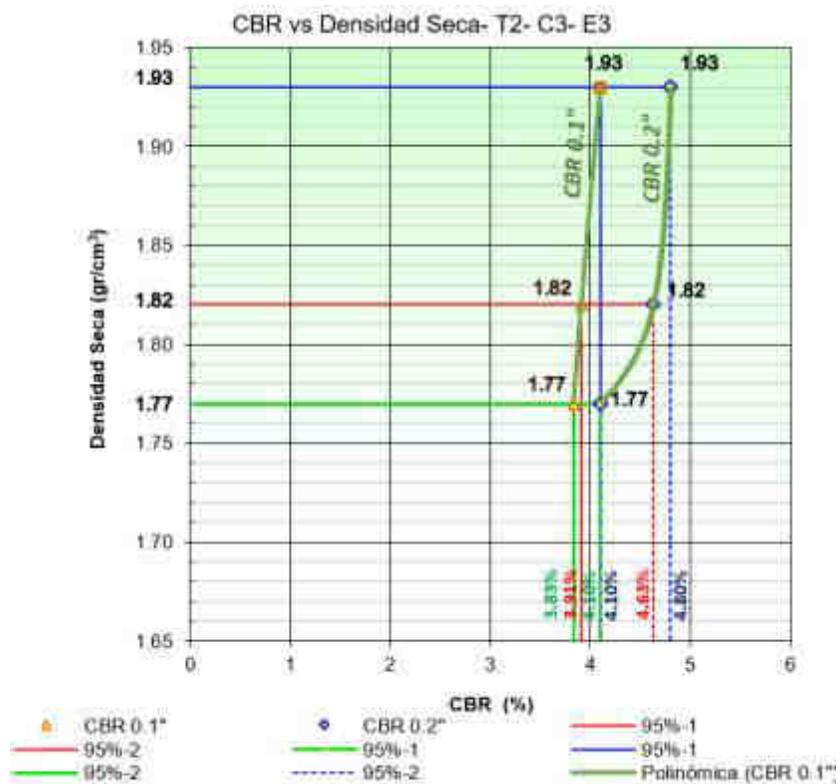


Figura 90: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Calicata N°3- Ensayo N°3



#### 4.7.2. Determinación de la dosificación y uso adecuado del tereftalato de polietileno

##### 4.7.2.1. Determinación de la forma geométrica óptima del tereftalato de polietileno, tramo 1

Tabla 121: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- Determinación de la forma geométrica óptima del tereftalato de polietileno

CB R	Ensayo N°1		Ensayo N°2		Ensayo N°3		Ensayo N°4		Ensayo N°5		Ensayo N°6	
	0.1''	0.2''	0.1''	0.2''	0.1''	0.2''	0.1''	0.2''	0.1''	0.2''	0.1''	0.2''
100 % MD S	7.43 %	9.30 %	7.59 %	10.30 %	7.67 %	10.80 %	7.6%	10.3 %	7.35 %	9.82 %	7.26 %	9.16 %
95% MD S	6.65 %	8.70 %	6.95 %	9.32 %	7.09 %	9.80 %	7.03 %	9.40 %	6.83 %	9.00 %	6.45 %	8.50 %

Fuente: Elaboración propia

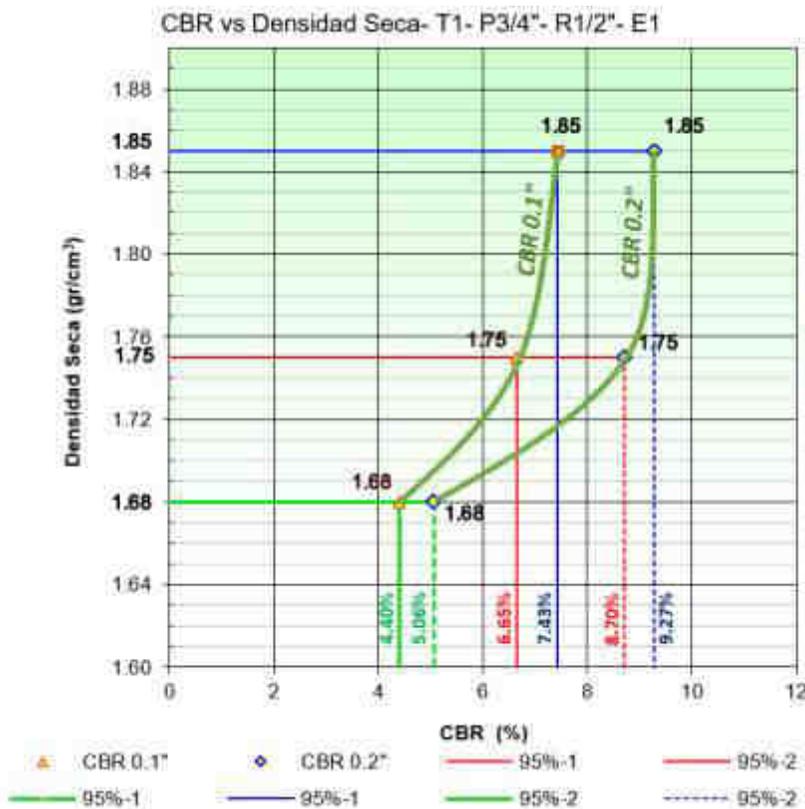


Figura 91: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 3/4''- Retenido 1/2''- Ensayo N°1

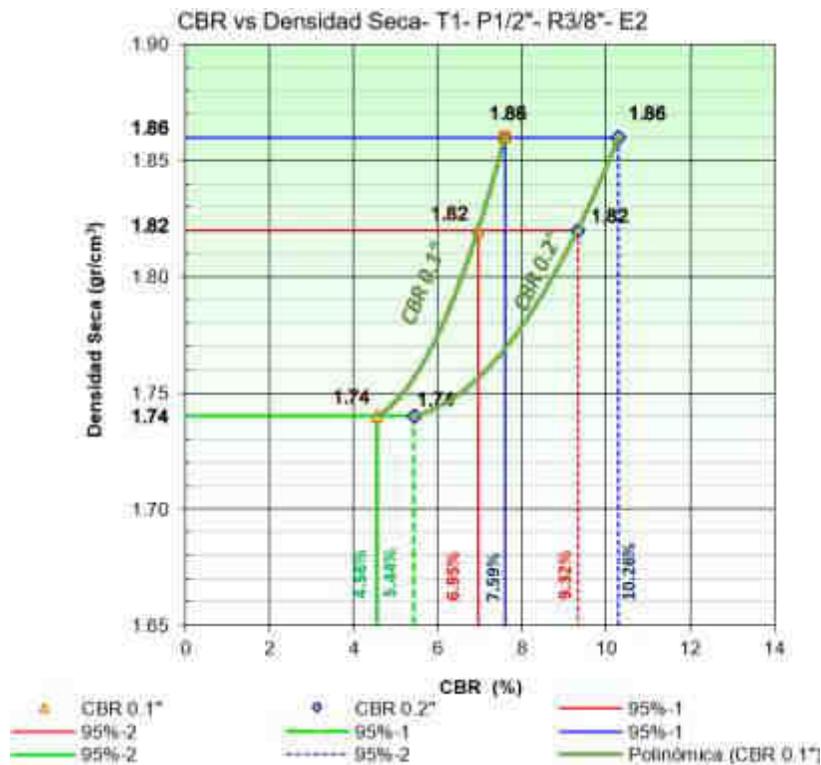


Figura 92: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/2''- Retenido 3/8''  
Ensayo N°2

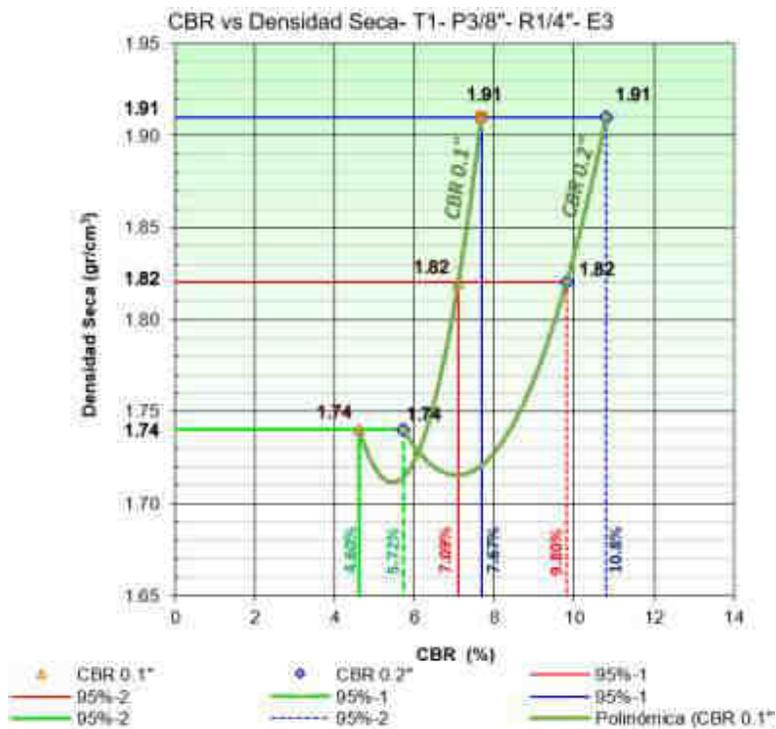


Figura 93: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 3/8''- Retenido 1/4''  
Ensayo N°3

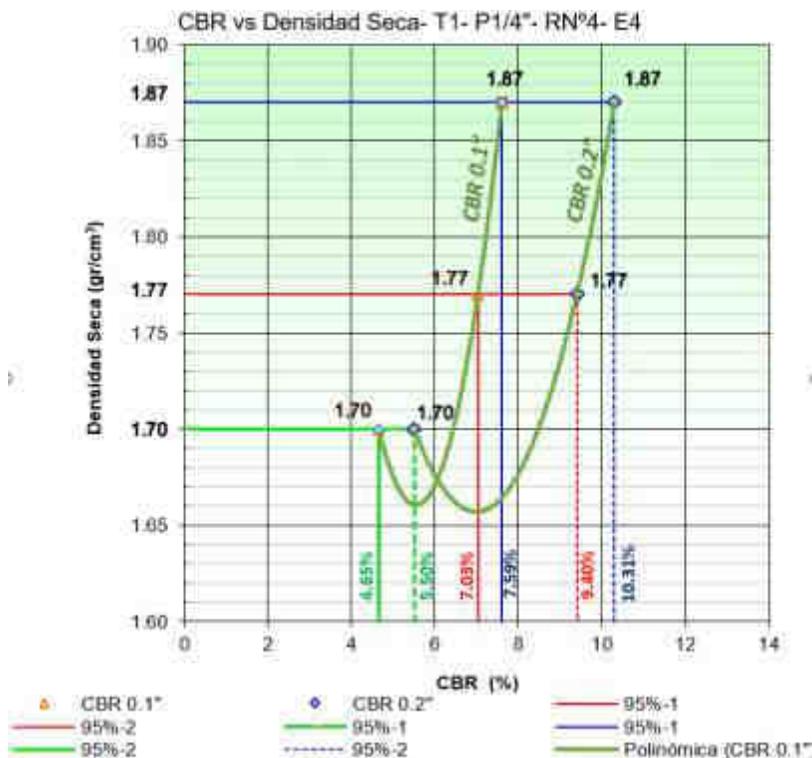


Figura 94: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante 1/4"- Retenido N°4 Ensayo N°4

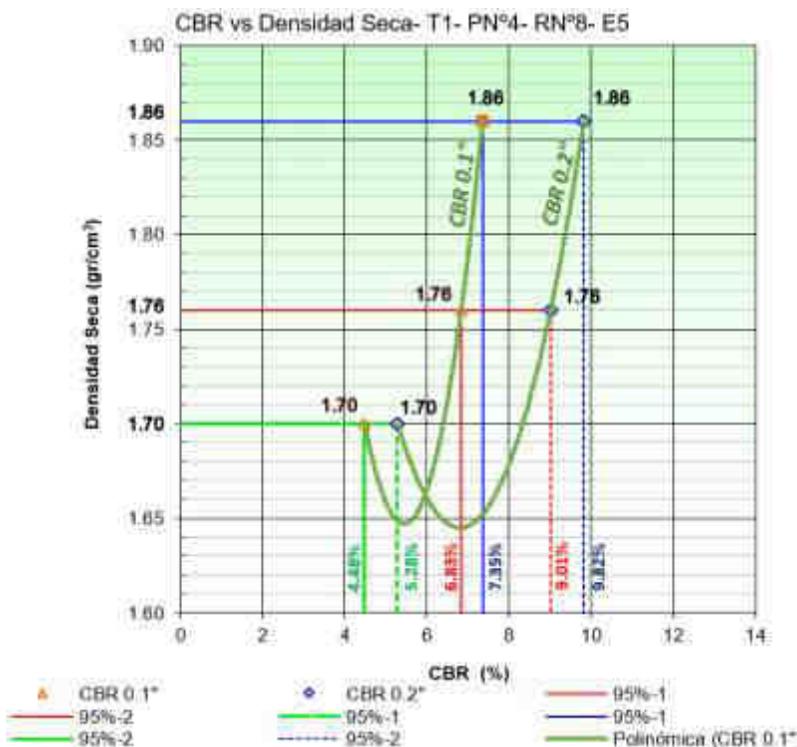


Figura 95: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Pasante N°4- Retenido N°8 Ensayo N°5

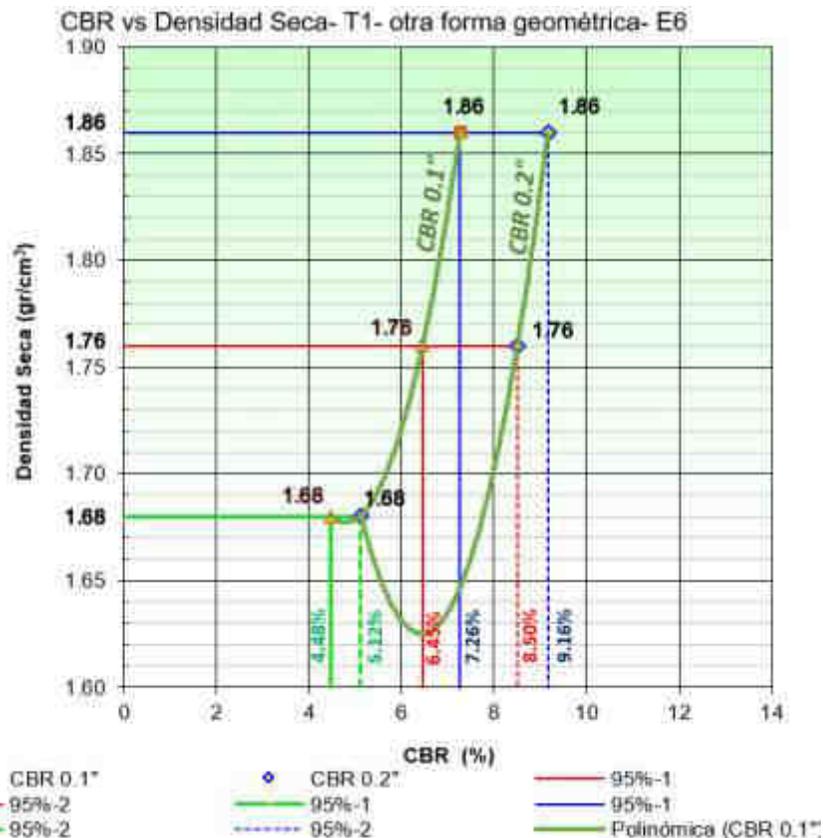


Figura 96: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- De otra forma geométrica- Ensayo N°6

Tabla 122: Dimensiones adecuadas del tereftalato de polietileno

Ensayo	Polímero a utilizar		Dimensión		CBR	%Incre.
	Pasante	Retenido	mm	mm		
Suelo natural	-	-	-	-	5.76%	
Ensayo N°1	3/4"	1/2"	19.1-12.7	12.7	6.65%	15.38%
Ensayo N°2	1/2"	3/8"	12.7-9.5	9.525	6.94%	20.42%
Ensayo N°3	3/8"	1/4"	9.5-6.4	6.35	7.09%	23.02%
Ensayo N°4	1/4"	N°4	6.4-4.8	4.763	7.03%	21.98%
Ensayo N°5	N°4	N°8	4.8-2.4	2.36	6.80%	17.99%

Fuente: Elaboración propia



Figura 97: Relación del valor de CBR con las dimensiones del Tereftalato de polietileno

#### 4.7.2.2. Determinación del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno- Tramo 1

Tabla 123: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- con variación de los porcentajes de tereftalato de polietileno- Tramo 1

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% MDS	7.0%	9.4%	7.6%	10.3%	7.8%	10.6%	7.5%	10.10%
95% MDS	6.50%	8.55%	6.96%	9.30%	7.17%	9.60%	6.87%	9.15%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 124: Determinación del % adecuado- Tramo 1

% DE POLIMERO	CBR	% INCREMENTO
0.00%	5.76%	
0.50%	6.50%	12.78%
1.00%	6.96%	20.76%
1.50%	7.17%	24.41%
2.00%	6.87%	19.20%

Fuente: Elaboración propia



### CBR vs Tereftalato de polietileno

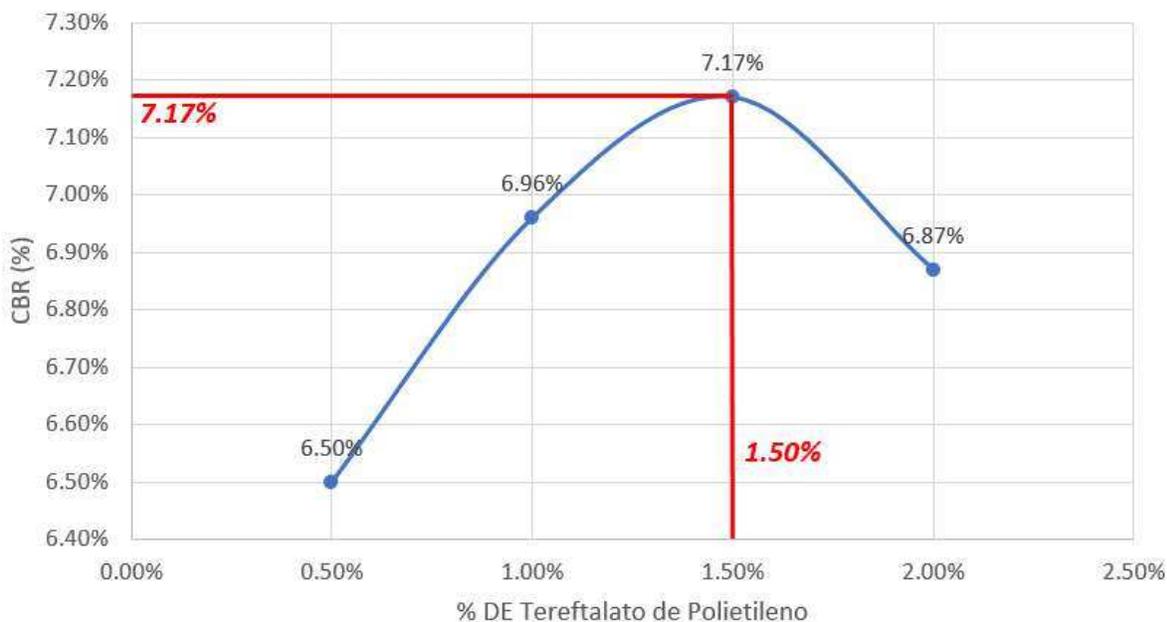


Figura 98: Relación del valor de CBR con el % adecuado de polímeros- tramo 1

### CBR vs Densidad Seca- T1- Porcentaje óptimo al 0.5%- E1

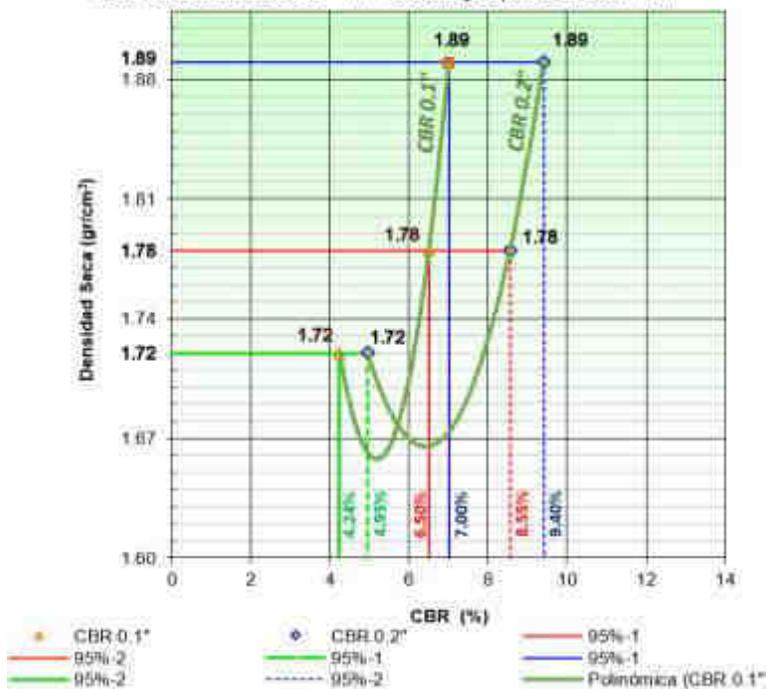


Figura 99: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1

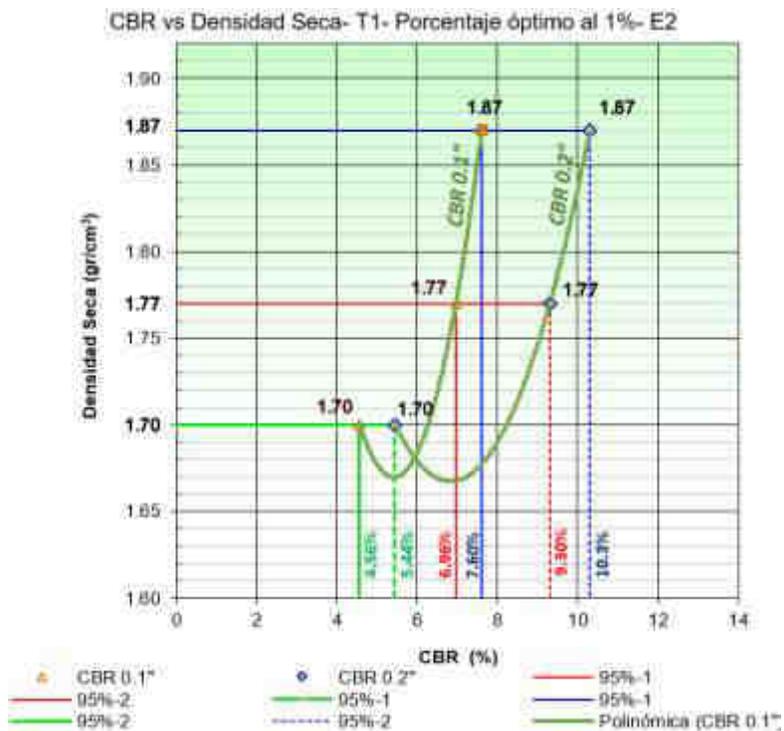


Figura 100: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2

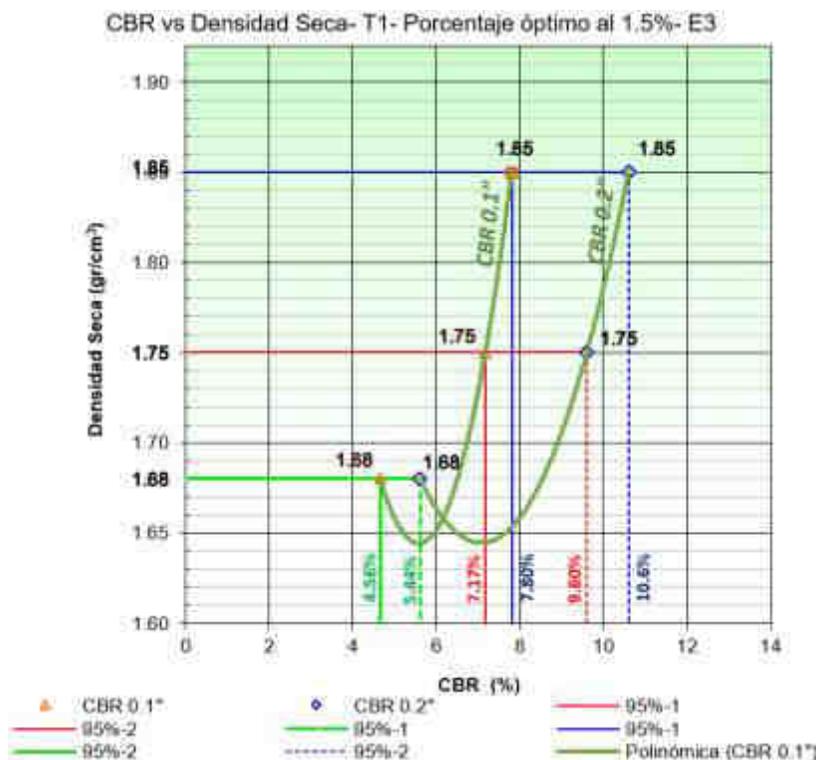


Figura 101: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3

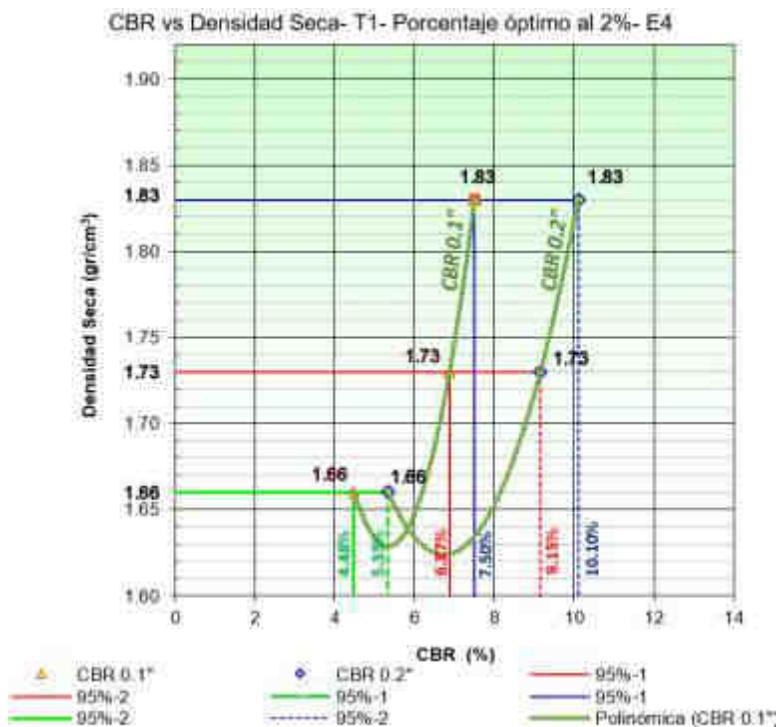


Figura 102: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 1- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4

#### 4.7.2.3. Determinación del porcentaje óptimo del tereftalato de polietileno- Tramo 2

Tabla 125: Resumen de resultados de CBR al 95% DMS- Tramo 2

CBR	ENSAYO 1		ENSAYO 2		ENSAYO 3		ENSAYO 4	
	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
100% DMS	4.70%	5.80%	5.10%	5.80%	5.30%	6.50%	5%	6%
95% DMS	4.45%	5.20%	4.70%	5.65%	4.85%	5.90%	4.64%	5.52%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 126: Determinación del % adecuado- Tramo 2

% DE POLIMERO	CBR	% INCREMENTO
0.00%	3.77%	
0.50%	4.45%	18.04%
1.00%	4.70%	24.67%
1.50%	4.85%	28.65%
2.00%	4.64%	23.08%

Fuente: Elaboración propia



### CBR vs Tereftalato de polietileno

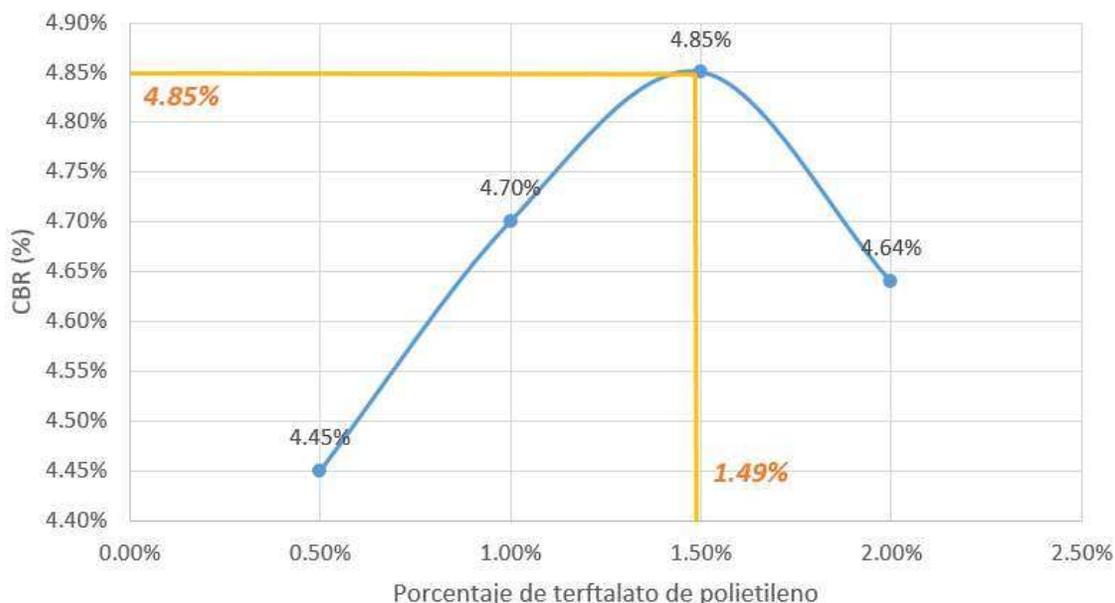


Figura 103: Relación del valor de CBR con el % adecuado de Tereftalato de polietileno-Tramo 2

### CBR vs Densidad Seca- T2- Porcentaje óptimo al 0.5%- E1

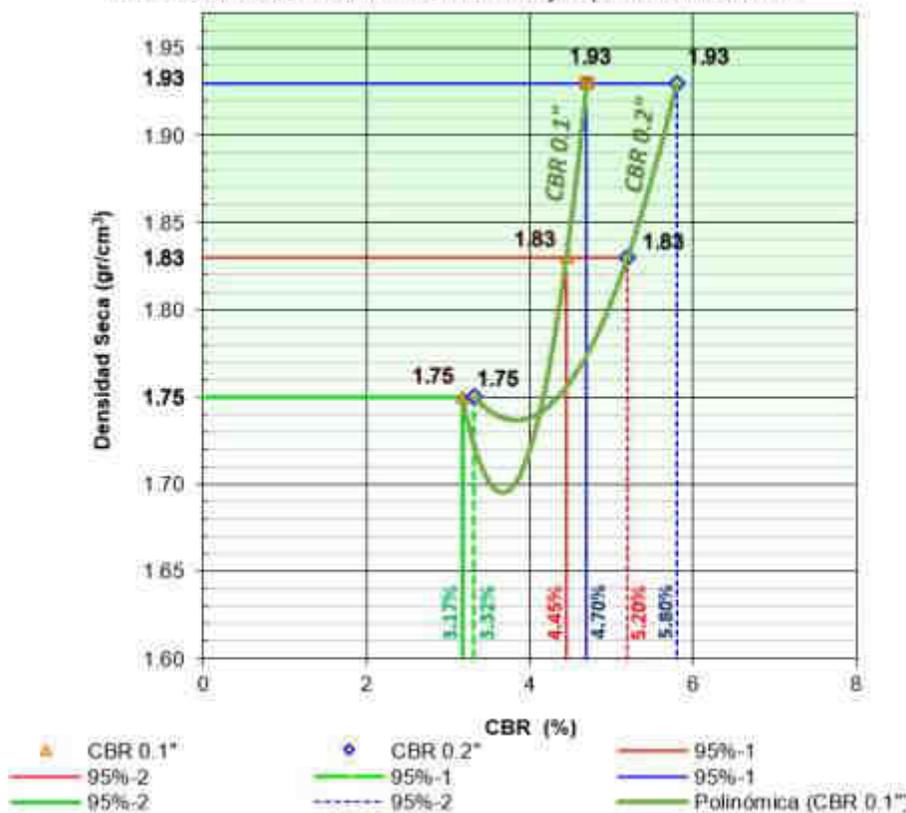


Figura 104: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 0.5%- Ensayo N°1

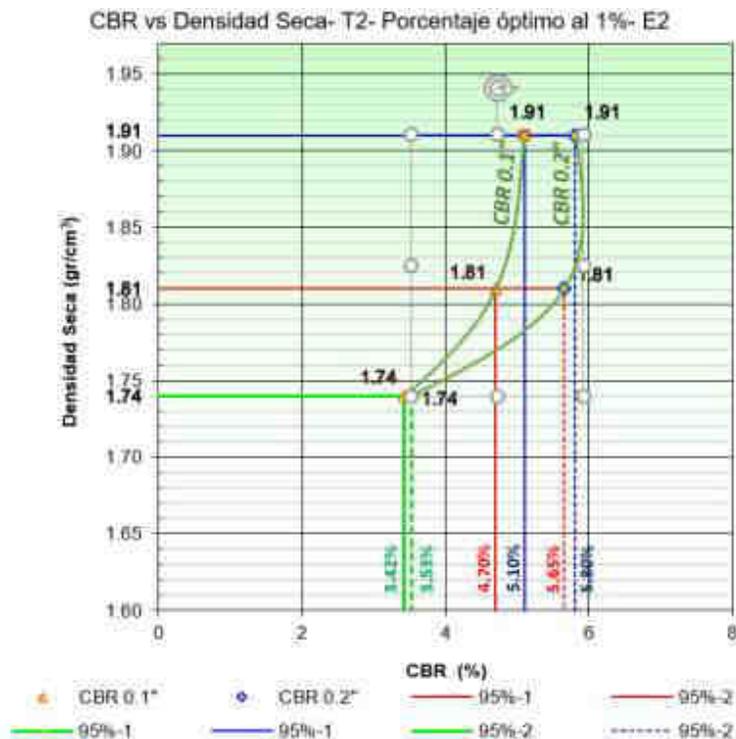


Figura 105: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1%- Ensayo N°2

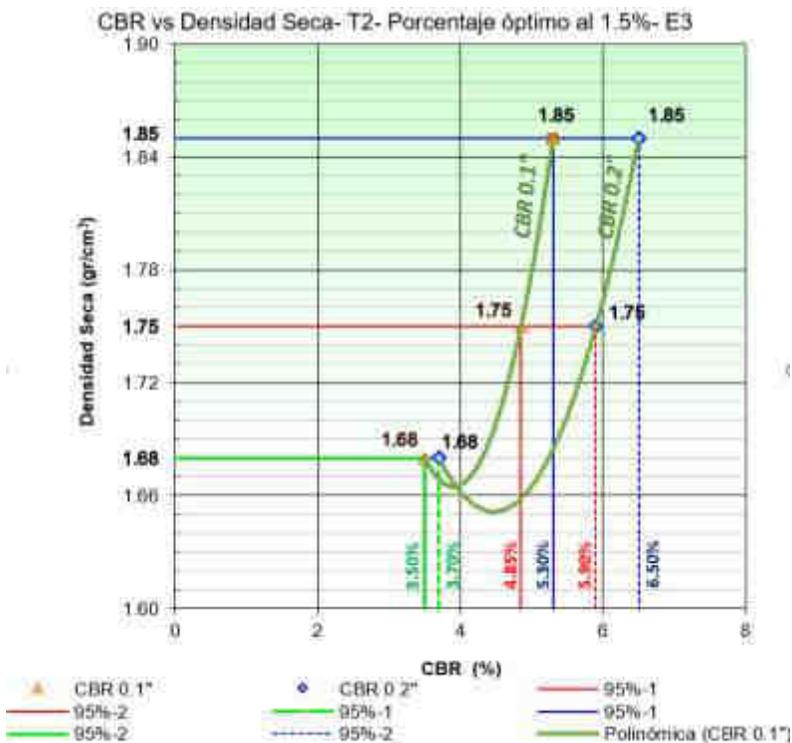


Figura 106: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 1.5%- Ensayo N°3

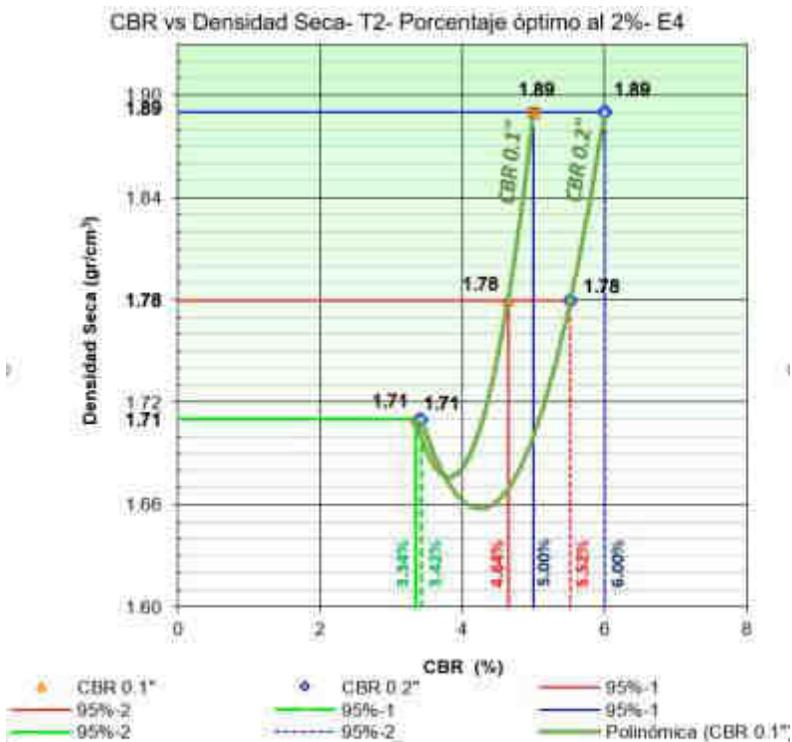


Figura 107: Determinación del CBR al 95% de DMS- Tramo 2- Porcentaje óptimo al 2%- Ensayo N°4

### 4.7.3. Determinación de la dosificación y uso adecuado de la cal

#### 4.7.3.1. Determinación del porcentaje óptimo de Cal mediante el uso de los límites de Atterberg.

N° de muestra	Variación de IP en mezclas de suelo Cal			Valor de IP
	% cal	Valor de límite líquido	Valor de Limite de Plasticidad	
1	2.5%	32.1	23.9	8.1
2	3.5%	31.3	27	4.30
3	4.5%	31	29.27	1.73
4	5.5%	30.8	NP	NP

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7.3.2. Determinación del ensayo proctor suelo más cal

Tabla 127: Ensayos suelo más cal al 5.5%

DMS (gr/cm3):	1.8390
CHO (%):	12.90%



Relación humedad- densidad seca con cal al 5.5%

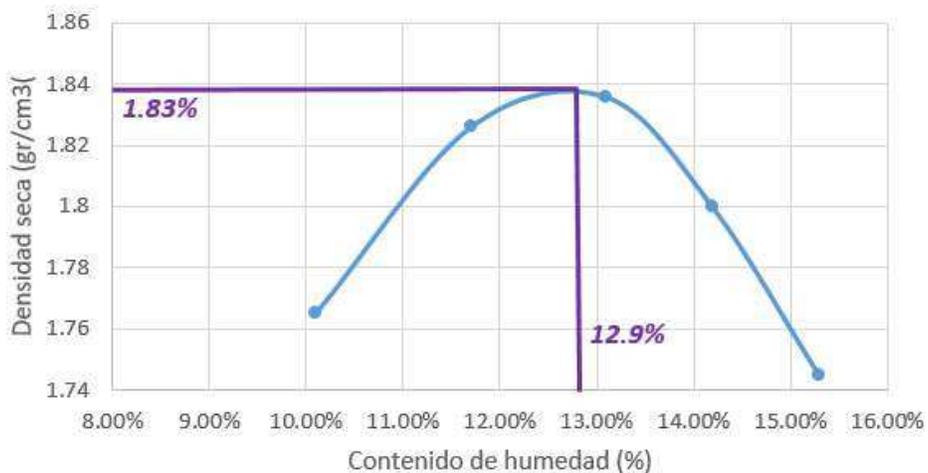


Figura 108: Relación Humedad – densidad seca al 5.5% de cal

### 4.7.3.3. Determinación del CBR con la adición de cal

Tabla 128: CBR suelo- cal al 95% DMS

CBR	0.1"	0.2"
100% MDS	20.30%	23.30%
95% MDS	16.89%	18.00%

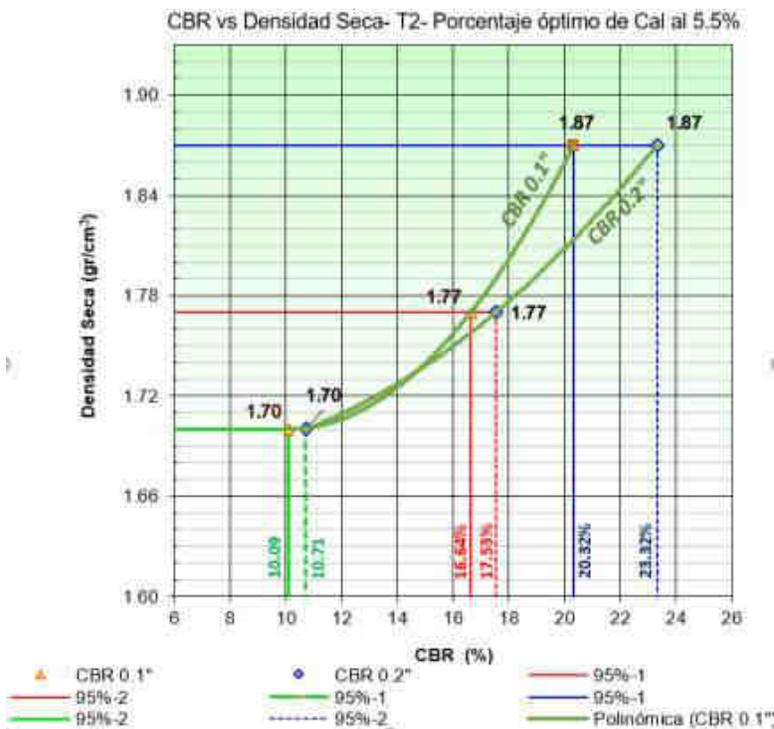


Figura 109: CBR vs Densidad seca- Tramo 2- Porcentaje óptimo de Cal al 5.5%



4.7.4. Resumen de resultados obtenidos:

Tabla 129: CBR al 95% DMS- Expansión- Tramo 1 y 2

Tramo	Material ensayado	CBR	Incremento CBR	Expansión	Disminución de expansión
		95% DMS			
Tramo 1	Suelo natural	5.76%		2.55%	
	Suelo + Tereftalato de polietileno	7.17%	24.48%	1.10%	56.86%
Tramo 2	Suelo natural	3.77%		3.20%	
	Suelo + Tereftalato de polietileno	4.85%	28.65%	1.64%	48.75%
	Suelo + Cal	16.89%	348.01%	0.64%	80%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 130: Promedio del incremento del CBR- disminución de la Expansión- Tramo 1 y 2

Promedio del incremento de CBR del Tramo 1 y Tramo 2 con Tereftalato de polietileno	26.57%
Promedio de disminución de expansión del Tramo 1 y Tramo 2 con Tereftalato de polietileno	52.81%

Fuente: Elaboración propia

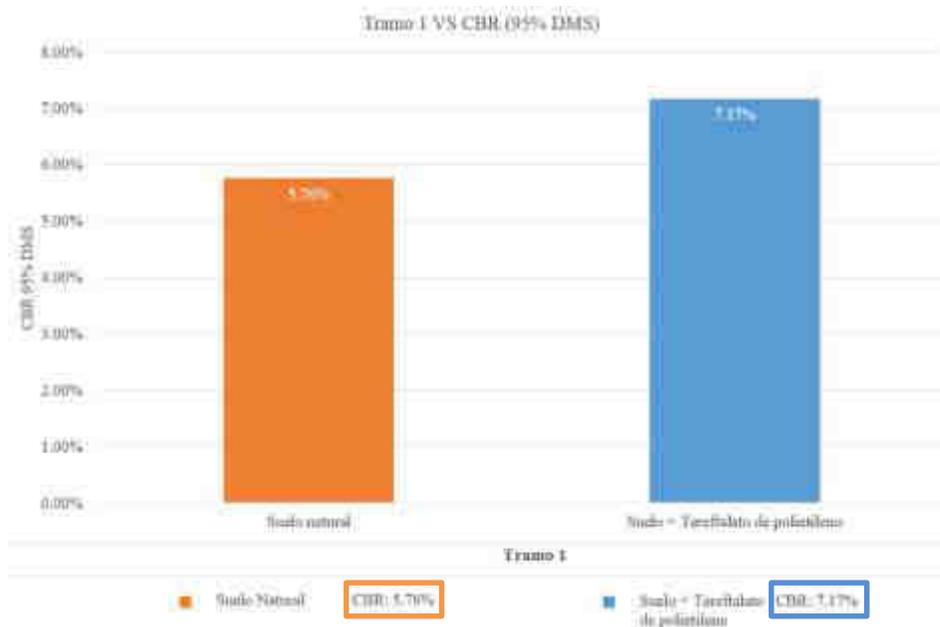


Figura 110: Tramo 1 VS CBR (95% DMS)

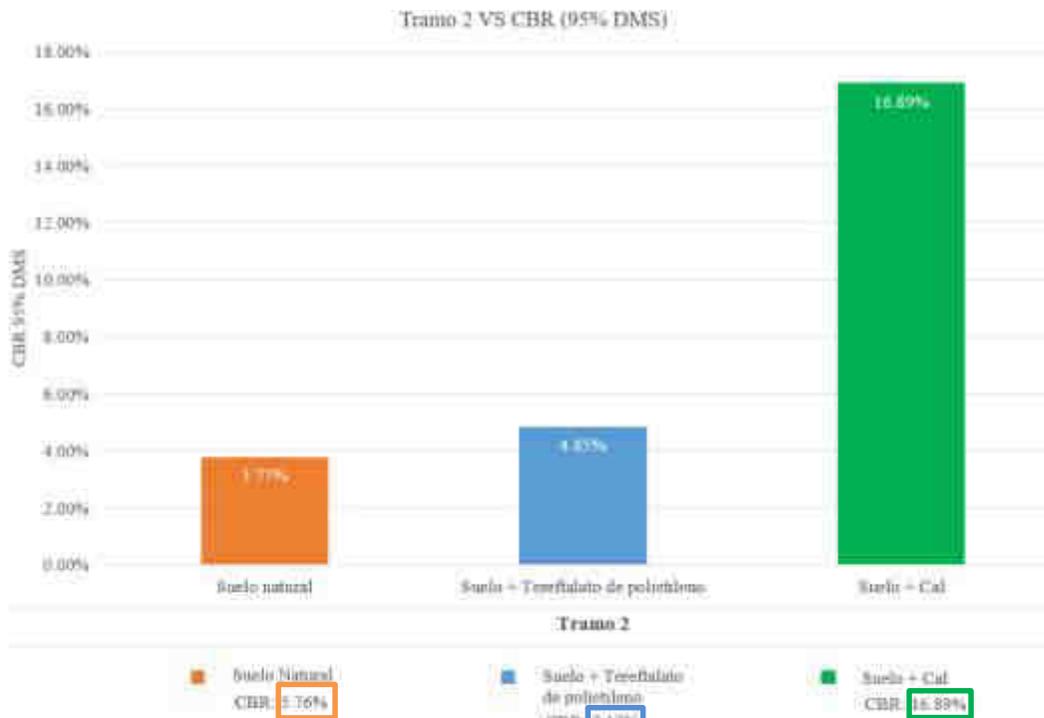


Figura 111: Tramo 2 VS CBR (95% DMS)



Figura 112: Tramos 1 y 2 VS CBR (95% DMS)

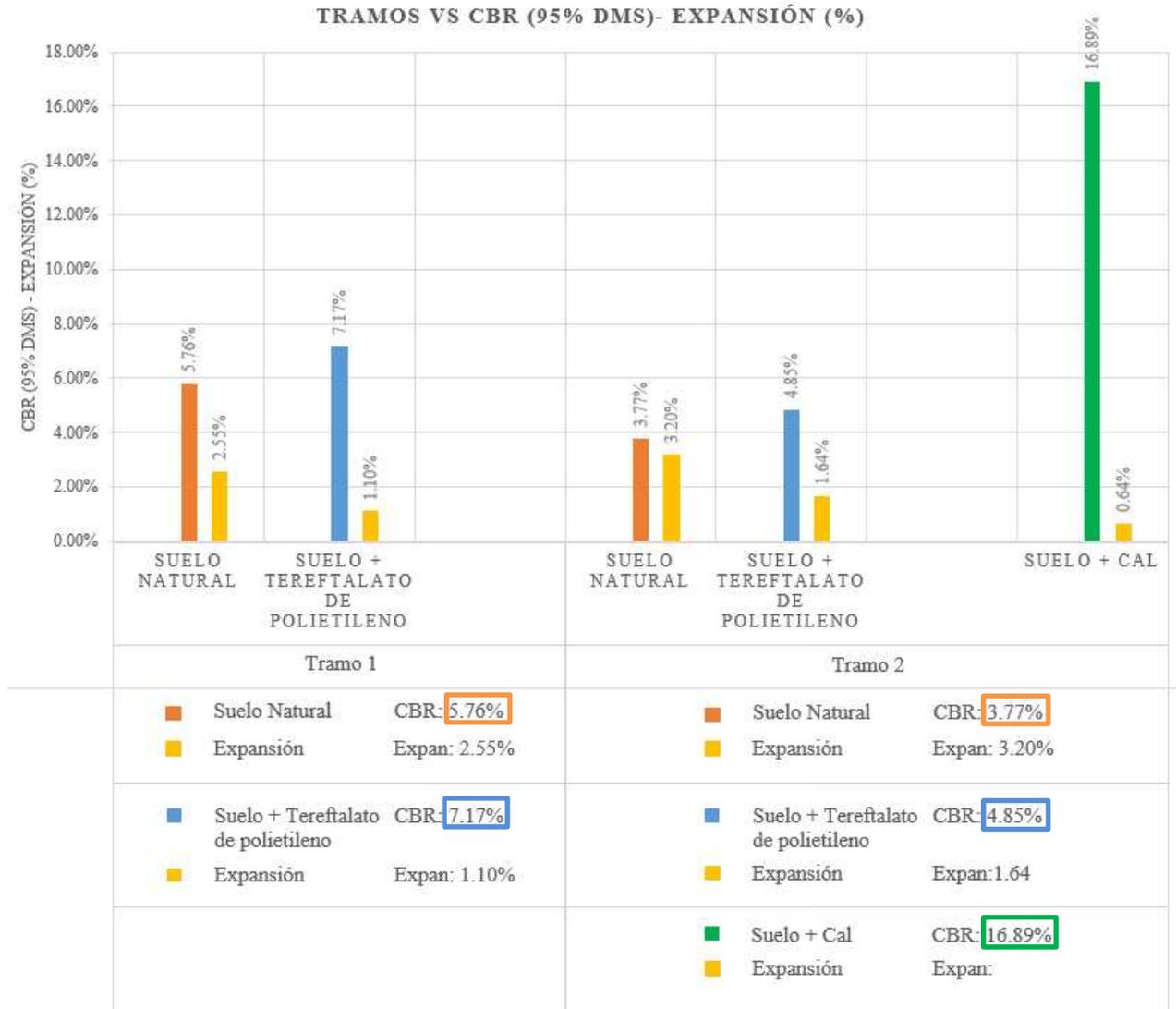


Figura 113: Tramos 1 y 2 VS CBR (95% DMS)- Expansión (%)

La diferencia de resultados obtenidos tanto de Cal y Tereftalato debido a que el primero es un material hidrogeno y por lo tanto desarrolla mayor estabilidad con el agua mientras que el tereftalato necesita encontrar un estado óptimo para ser aplicado. Por lo tanto, la Cal con dicha dosificación alcanza un valor de hasta 348% de CBR, mientras el tereftalato un hasta un 26.57%.



## 5. Capítulo V: Discusión

### 5.1. Contraste de resultados con referentes del marco teórico

**Discusión 01.-** ¿Las propiedades físicas del suelo son similares a los resultados obtenidos en las investigaciones consignadas como antecedentes?

Las propiedades físicas analizadas en la presente investigación fueron el contenido de humedad, límites de Atterberg, análisis granulométrico, gravedad específica y clasificación de suelos SUCS y AASHTO. La determinación del contenido de humedad del suelo se muestra en la Tabla N°16 con un valor de 21.13%.

En las investigaciones anteriores revisadas se observó que la mayoría de las propiedades físicas tienen diferentes propiedades, así mismo tienen contenidos de humedad que varían desde 22.40% a 24.50%.

### 5.2. Interpretación de los resultados encontrados en la investigación

**Discusión 02.-** ¿Cómo se establece la comparación de las propiedades físico mecánicas del suelo con tereftalato de polietileno y la cal?

Con la adición del tereftalato de polietileno obtenidos de las botellas descartables, solo se logra mejorar las propiedades del suelo con material para subrasante, razón por la cual se adiciona el tereftalato de polietileno al 1.5% del peso seco del suelo observando un incremento porcentual en promedio del CBR en 26.57%, por otro lado, la cal mejora sus propiedades adicionando un 5.5% del peso seco del suelo alcanzando un CBR hasta un 350% en el suelo estudiado.

### 5.3. Comentarios de la demostración de la hipótesis

**Discusión 03.-** ¿El incremento del tereftalato resulta favorable en la evaluación de las propiedades mecánicas del suelo de Maras- Moray?

El incremento del tereftalato fue en los porcentajes de 0.5%, 1%, 1.5% y 2%, el adecuado incremento se vió comprometido al adicionar un 1.5% con respecto al peso seco del suelo alcanzando mejoras en las propiedades mecánicas del CBR, por otro lado, la cal logra tener mejores resultados con respecto al CBR, alcanzando valores con un incremento de hasta 350%.



#### 5.4. Aporte de la investigación

**Discusión 04.-** ¿Por qué se realizó la comparación del tereftalato de polietileno con respecto a uno estabilizado según la norma del MTC?

Para analizar en qué medida varia un suelo estabilizado con tereftalato de polietileno y un suelo estabilizado según la norma del MTC (cal), dándole un valor agregado al tereftalato obtenido de las botellas descartables y aportando a su vez con el medio ambiente, de la misma manera elegir según sus propiedades físico mecánicas cual sería el mejor estabilizador para el suelo de la carretera de Maras Moray

#### 5.5. Incorporación de temas nuevos

**Discusión 05.-** ¿Existe alguna guía, referencia local o nacional para la valoración del tereftalato de polietileno para diferentes estabilizaciones en otras carreteras con diferente tipo de suelo?

Para obtener la información necesaria, se hizo indagaciones a nivel local e internacional, y verificar la existencia de una guía o protocolo, viendo que no se encontró una en específico se tuvo que interpretar información relacionada a nuestro tema de investigación y hacer un análisis crítico para poder realizar la estabilización de suelos con tereftalato de polietileno y cal para la carretera de Maras- Moray.

**Discusión 06.-** ¿Por qué existe tanta variación de resultados obtenidos en los ensayos de las 04 calicatas de la Carretera Maras- Moray, provincia de Urubamba?

La variación de resultados de la misma carretera Maras- Moray, se debe principalmente a la zona de extracción, ya que se obtuvieron las muestras de las calicatas en zonas críticas de la carretera, como por ejemplo donde hubo presencia de lodazales, inestabilidad de taludes, pendientes pronunciadas, accidentes de tránsito, curvas peligrosas, etc. Dando resultados diferentes debido a la vulnerabilidad de la carretera Maras- Moray.

**Discusión 07.-** ¿Es posible uniformizar el suelo a tratar con un solo tipo de dosificación, tomando en cuenta aquellos tramos con presencia de agua u otras condiciones del suelo?

Para hallar la dosificación del tereftalato de polietileno o cal, se realizaron ensayos de CBR, dando resultados favorables para tener una adecuada capacidad de soporte mayor o igual al 6%, dando como dosificación adecuada un 1.5%, si se tuviera que uniformizar todo el suelo a tratar, se podría



utilizar la dosificación hallada, debido a que se realizaron muestras de material en zonas críticas, dando resultados de dosificación adecuados para dichos tramos críticos.

**Discusión 08.-** ¿Qué entidad está encargada del mantenimiento de la carretera Maras- Moray?

La entidad encargada del mantenimiento de la carretera Maras- Moray es la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones Cusco, se encarga de mejorar, rehabilitar y conservar la red vial departamental de la Región Cusco, que dinamice y garantice el traslado de personas de forma cómoda y segura.

**Discusión 09.-** ¿La aplicación del tereftalato de polietileno en suelos cohesivos es similar con respecto a otro tipo de suelo?

Se usó el tereftalato de polietileno con fines de estabilizar la carretera de Maras- Moray, debido a que no existe una normativa para usar el tereftalato de polietileno en un tipo de suelo en específico, se usó en un suelo arcilloso, por tal motivo es necesario poder realizar más investigaciones del tereftalato de polietileno en suelos con presencia de grava, arena, limo, etc. Para que de esa manera se pueda elegir el tereftalato de polietileno en un tipo de suelo en específico.



## Glosario

**Aditivo:** Componentes con composición orgánica o inorgánica, cuyo objetivo es el de modificar las propiedades físicas conglomerantes en un estado fresco. Pueden ser presentados en forma de líquido como el aditivo.

**Agregado:** Porción del suelo que pasa el tamiz de  $\frac{3}{4}$ " y queda retenido en el tamiz N° 4.

**Bien gradado:** Suelo, en el cual, existe una gradación continua de tamaños de partícula.

**Capacidad de soporte:** Es la carga que un suelo puede soportar sin producir deformaciones excesivas, se determina mediante el ensayo de CBR en bases, subbases y subrasantes de suelos mediante un índice de resistencia denominado valor de la relación de soporte.

**CBR:** Es un ensayo que se usa para determinar la capacidad de soporte de bases, subbases y subrasantes de suelos mediante un índice de resistencia denominado valor de la relación de soporte, previamente a la realización del ensayo se debe de conocer la humedad óptima y la máxima densidad seca del suelo.

**Capacidad portante:** Es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo.

**Cohesión:** Es la cualidad que poseen las partículas de suelo para poder mantenerse unidad en virtud de sus fuerzas internas actuantes.

**Compactación:** Es el proceso por el cual, se ejerce una carga sobre algún material para incrementar el contacto de las partículas, eliminado el aire en los poros.

**Compactación:** Es un proceso mediante el cual se hace uso de una energía externa para que homogenice las propiedades de otro componente.

**Densidad:** Se refiere a la cantidad de masa que ocupa un material por cada unidad cúbica.

**Energía modificada:** Energía de compactación equivalente a la del ensayo de Proctor Modificado.

**Estabilización:** Se refiere al proceso mediante el cual se hace uso de un material para modificar de un componente base.

**Granulometría:** Proceso mediante el cual se realiza una selección del material en diferentes tamaños.

**Humedad:** Agua de que está impregnada un cuerpo o que, vaporizada, se mezcla con el aire.

**Material fino:** Porción del suelo que pasa el tamiz N° 4.

**Material Heterogéneo:** es aquel material que no presenta las mismas propiedades elásticas, tales como módulo de elasticidad y coeficiente de poisson. Está compuesto por elementos diferentes



**Peso seco:** Es el peso de un material que no contiene humedad.

**Propiedades mecánicas:** Son aquellas propiedades de los sólidos que se manifiestan cuando aplicamos una fuerza. Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de los mismos de resistir acciones de cargas: las cargas o fuerzas actúan momentáneamente, tienen carácter de choque.

**Resistencia a la compresión:** Es la propiedad de un material que mide la resistencia de una carga por unidad de área cuadrada.

**Subrasante:** Parte de la estructura de un suelo que sirve de soporte, con la función de recibir las cargas externas que se producen en el exterior.

**Tamizado:** Proceso mediante el cual se realiza una selección comparativa de los diferentes granos respecto a sus tamaños que presenta cada muestra.

**Tereftalato:** Componente orgánico procedente de las botellas plásticas para su respectivo uso.



## Nomenclatura

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials - Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes
<b>CBR</b>	California Bearing Ratio – Relación de Soporte de California
<b>MTC</b>	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
<b>MTC E 107</b>	Análisis granulométrico de suelos por tamizado
<b>MTC E 108</b>	Determinación del contenido de humedad de un suelo
<b>MTC E 110</b>	Determinación del límite líquido de los suelos
<b>MTC E 111</b>	Determinación del límite plástico de los suelos e índice de plasticidad
<b>MTC E 113</b>	Método de ensayo estándar para la gravedad específica de sólidos
<b>MTC E 115</b>	Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (Proctor Modificado)
<b>MTC E 132</b>	CBR de suelos (laboratorio)
<b>SUCS</b>	Sistema unificado de clasificación de suelos



## Conclusiones

### Conclusión 01

Se concluyó que el incremento logrado del CBR con la adición de tereftalato de polietileno es bajo en comparación a lo normado por el MTC (suelo - cal). Obteniéndose resultados del incremento porcentual de la capacidad de soporte en términos de CBR para el tereftalato en 26.57% y la Cal de hasta un 350%, con respecto a la expansión disminuye favorablemente con el tereftalato en 52.81%, y más aún en la cal disminuye hasta en 80%.

### Conclusión 02

Se concluye que las propiedades de la subrasante de la presente carretera varían en términos de porcentaje debido a varios factores, por ejemplo las muestras de calicatas fueron extraídas de tramos críticos y vulnerables de la carretera, otro factor es la dosificación de cal y tereftalato de polietileno añadido en los ensayos, y finalmente las variaciones climatológicas de la zona.

### Conclusión 03

Se concluyó que una dosificación de un 1.5% del tereftalato de polietileno en el primer tramo, logró incrementar el máximo valor de CBR, siendo el valor óptimo para el suelo estudiado con un valor de CBR de 7.17 %, el cual es mayor al 6% como estipula la norma para suelos de subrasante, con respecto al segundo tramo se tuvo un valor de CBR de 4.85%, siendo menor a lo normado, razón por la cual se utilizó otro método de estabilización como es el suelo- cal, obteniendo así un CBR de 16.89%, un valor apto para la subrasante de suelos.

### Conclusión 04

El CBR del suelo estudiado con tereftalato de polietileno no es superior en un 4% respecto al suelo estabilizado según la norma recomendado por el MTC.

La adición de tereftalato de polietileno, que se obtuvieron de las botellas descartables PET, solo se logró mejorar las propiedades físicas mecánicas del suelo como material para subrasante, el suelo estudiado presenta gran porcentaje de arcillas, siendo su granulometría muy fina y carente de partículas de mayor diámetro que son muy importantes para una buena capacidad de soporte, de este modo al adicionar el tereftalato de polietileno al 1.5% del peso del suelo seco, con dimensiones entre 5 y 10 mm de forma rectangular, se aprecia un incremento porcentual en promedio de los 02 tramos del CBR en 26.57%, debido a que el tereftalato de polietileno es un material resistente y al adicionar al suelo hace que tenga mayor fricción y por lo tanto mayor capacidad de soporte.



## Recomendaciones

### Recomendación 01

Se recomienda utilizar diferentes porcentajes de tereftalato de polietileno al 0.3%, 0.6%, 0.9% y 1.2% para diferentes investigaciones futuras, de tal manera para verificar si existe algún incremento en términos de CBR para ser comparado con el recomendado por la norma del MTC y ser implementadas en posteriores investigaciones.

### Recomendación 02

Se recomienda tener énfasis en el cálculo para determinar el porcentaje de cal óptimo, debido a que influye directamente en el valor del CBR, dando como resultado excelentes porcentajes de CBR y así mismo la disminución en la expansión, cabe resaltar que la cal es eficiente para determinados tipos de suelos, como se menciona en la norma del MTC, existen diferentes tipos de estabilizadores, y cada uno de ellos debe adaptarse a las características del tipo de suelo para poder estabilizar.

### Recomendación 03

Es recomendable profundizar la investigación utilizando otros materiales reciclables que ayuden con el cuidado y protección del medio ambiente, como las tuberías de PVC, vasos térmicos, poli estireno expansible, cristal, entre otros.

### Recomendación 04

Es recomendable conocer el tipo de suelo realizando los estudios y propiedades necesarias, para poder desarrollar nuevas investigaciones cuantitativas, para poder profundizar el nivel de usos que tenga el tereftalato de polietileno.

### Recomendación 05

Es recomendable que, para un análisis aplicativo de una carretera, se debe conocer con exactitud el tipo de suelo y el tipo de carretera, para poder determinar en función del estabilizante, un precio estimado del material, la mano de obra y herramienta manuales, con el fin de analizar si es factible o no en comparación a otros estabilizadores.



### **Recomendación 06**

Es recomendable usar el tereftalato de polietileno para aumentar la durabilidad de la carretera, pero en cuanto a costo de producción es superior al de la cal, ya que el tereftalato necesita pasar un proceso de tamizado para luego ser utilizado, sin embargo, esto no descarta la mejora para el suelo de estudio.

### **Recomendación 07**

Es recomendable profundizar la investigación con respecto a niveles freáticos y al tipo de suelo, debido a que puede influir directamente en las dosificaciones para el estudio del suelo o inducir a un mayor margen de error.



## Referencias

- AASHTO (1993). American Association of state Highway Transportation Officials. Guide for design of pavement Structures. Washington D.C.
- ASTM D-854, AASHTO T-100, J. E. Bowles (Experimento N° 7)
- Ancade, (2002). Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España Manual de estabilización de suelos con cal., Madrid.
- Bañon Luis, Bevia José (2010). Manual de Carreteras Construcción y Mantenimiento (Vol. 2).
- Bowles J.E. (1981). Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil (28 Ed.). México 8, D.F., México: McGraw Hill Interamericana.
- Braja M, D. (2001). Fundamentos de ingeniería geotecnia (58 Ed.). México, D.F., México: Interracial Thomson editores.
- Centro Nacional de Planeamiento estratégico. (2018). Red departamental de sectores, Perú CEPLAN
- Crawford, R., Webb, H., Amott, J., Ivanova, E. (2013). «Plastic degradation and its environmental implications with special reference». Polymers
- Gamica, P., Pérez, A, Gómez, J., Ovil, E. (2002). Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres. (Documento Técnico No. 201). Instituto Mexicano del transporte. México.
- Gómez Betancourt, Edgar. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras tomo i. Columbia: Ágora editores.
- Hernández, J. (2008). Características físicas y propiedades mecánicas de suelos y sus métodos de medición. Guatemala



- Icg, & gerencia, i. d. (2010). Estabilización de suelo-cal de la sub rasante de las vías urbanas de la ciudad de Juliaca, 11.
- Lambe. (2004). “Mecánica de suelos” Instituto Tecnológico de Massachussets- Limusa. México.
- LIME Nacional Lime Association (2006 noviembre). Manual de estabilización de suelo tratado con cal. (Boletín 326).
- López T., Hemández J., Horta J., Coronado A. & Castaño V. (2010, Mayo). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. (Vol. 11 (3)) Revista Iberoamericana de Polímeros.
- Menéndez Acurio, J.R. (2013 a). Ingeniería de pavimentos: diseño y gestión de pavimentos (1 8 Ed.).Lima, Perú: imprenta ICG
- Menéndez Acurio, J. R. (2013 b). Ingeniería de pavimentos: materiales y variables de diseño (43 Ed.).Lima, Perú: imprenta ICG.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2008 a). Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de caminos y Ferrocarriles. (2008 b). Manual de especificaciones técnicas generales para construcción de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2013 a). Manual de carreteras: mantenimiento o conservación vial. Lima, Perú.



- Montejo Fonseca, A. (2002). Ingeniería de pavimentos para carreteras (23 Ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia ediciones y publicaciones.
- Nacional Lime Association. (enero de 2004). Manual de estabilización de suelo tratado con cal. estabilización y modificación con cal.
- Quintero Díaz, (2016). Diseño de una planta de reciclado de tereftalato de polietileno (PET). España.
- Ravines Merino (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. Tesis para optar el título de ingeniero civil, Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Rico, A., Del Castillo, H. (2005). La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas (Vol. 1 ). México: Editorial Limusa S.A.
- Valle, W. (2010). Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.



## Anexos

### Anexo 1- Matriz de consistencia

#### MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: "EVALUACIÓN COMPARATIVA DE UN SUELO ESTABILIZADO CON TEREFTALATO DE POLIETILENO, RESPECTO A UNO ESTABILIZADO SEGÚN LA NORMA DEL MTC PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE EN LA CARRETERA MARAS- MORAY, PROVINCIA DE URUBAMBA".

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	INSTRUMENTOS	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE				
¿En que medida varía un suelo con tereftalato respecto a uno estabilizado de acuerdo a la norma del MTC para la estabilización de la subrasante de la carretera Maras- Moray?	Determinar la variación de un suelo con tereftalato respecto a uno estabilizado de acuerdo a la norma del MTC para la estabilización de la subrasante de la carretera Maras- Moray	El suelo con tereftalato obtiene mayor beneficio que el suelo estabilizado de acuerdo a la norma del MTC en la subrasante de la carretera Maras-Moray	TEREFTALATO DE POLIETILENO	Calidad Composición química Concentración Dosificación	Cantidad en peso del tereftalato Tipo de suelo	Fichas de laboratorio	Se utilizará el método hipotético deductivo
				Suelo estabilizado de acuerdo a la norma del MTC	Tipo de suelo Tipo de estabilización		
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE			NORMAS	
¿Cómo varía el comportamiento de las propiedades de la subrasante al aplicar tereftalato respecto al estabilizante recomendado por el MTC(Cal) en la carretera MARAS MORAY ?	¿Determinar el comportamiento de las propiedades de la subrasante al aplicar tereftalato de polietileno respecto al estabilizante recomendado por el MTC(Cal) en la carretera MARAS MORAY.	Las propiedades de la subrasante varían incrementándose principalmente los límites de consistencia al usar tereftalato respecto al estabilizante recomendado por el MTC en la carretera MARAS MORAY	ESTABILIZACIÓN DE LA SUBRASANTE	Propiedades de la subrasante	Contenido de humedad Granulometría Límite líquido Límite plástico Gravedad específica	AASHTO	Tipo de investigación
¿Cuál es la dosificación adecuada con el Tereftalato de Polietileno que incrementan el CBR de la carretera?	Determinar la dosificación adecuada con el Tereftalato de Polietileno que incrementan el CBR de la carretera.	Al añadir una dosificación del 4% en el tereftalato, se logrará alcanzar el CBR óptimo para la carretera.		Dosificación	Cantidad de tereftalato		
¿Cómo varía el CBR en el suelo estabilizado con tereftalato respecto al estabilizado según la norma del MTC?	Analizar la variación del CBR en un suelo estabilizado con tereftalato respecto al estabilizado según la norma del MTC.	El CBR del suelo con tereftalato es superior en 4% respecto al suelo estabilizado según la norma del MTC.		CBR	Proctor modificado	Norma del MTC	Según el enfoque: Cuantitativo

Fuente: Elaboración propia