



**Universidad
Continental**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

**Efecto de la adición de fibra de polímeros
reciclados en el valor del CBR de suelos
granulares en pavimentos**

Vargas Quispe Nadia Pamela

Huancayo, 2017

Tesis para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil



Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

ASESOR

Ing. Augusto García Corso.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Continental, por los conocimientos aportados.

Al Ingeniero Augusto García Corzo, por el apoyo y asesoramiento impartido para la elaboración de esta tesis.

DEDICATORIA

A mis padres por la paciencia, comprensión y todo el apoyo brindado.

A mi personita especial que pronto estará en mis brazos y es mi gran motivación.

INDICE

ASESOR	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
INDICE.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE ILUSTRACIONES	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	xiv
CAPÍTULO I PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	2
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	2
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.5. DELIMITACIÓN.....	3
1.5.1. GEOGRÁFICO	3
1.5.2. TIEMPO.....	4
1.6. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	4
1.6.1. HIPÓTESIS GENERAL	4
1.6.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	4
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ANTECEDENTES	5
2.1.1. ANTECEDENTE INTERNACIONAL	6
2.1.2. ANTECEDENTE NACIONAL.....	7
2.2. LA MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA DE PAVIMENTOS.....	7
2.2.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	10
2.2.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS: DIFERENCIAS Y CONCORDANCIAS	13
2.3. BASES TEÓRICAS.....	16

2.3.1.	SUBBASE	16
2.3.2.	FUNCIONES DE LA CAPA GRANULAR DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE	17
2.3.3.	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....	27
2.3.4.	PROCTOR MODIFICADO	42
2.3.5.	VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA	54
2.3.6.	POLÍMEROS RECICLADOS	65
CAPÍTULO III METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS		72
3.1.	MÉTODO GENERAL: MÉTODO CIENTÍFICO.....	72
3.2.	MÉTODO APLICADO	73
3.3.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	73
3.3.1.	POBLACIÓN.....	73
3.3.2.	MUESTRA.....	73
3.4.	TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	74
3.4.1.	TÉCNICAS.....	74
3.4.2.	INSTRUMENTOS	74
3.5.	PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	75
3.5.1.	SELECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO DE CANTERA.....	77
3.5.2.	ENSAYOS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	78
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS.....		97
4.1.	OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICA MECÁNICAS DEL MATERIAL DE LA CANTERA	97
4.1.1.	CONTENIDO DE HUMEDAD	97
4.1.2.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	97
4.1.3.	CLASIFICACIÓN SUCS Y AASHTO.....	104
4.1.4.	ENSAYO PROCTOR.....	104
4.1.5.	ENSAYO CBR	105
4.2.	DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN Y USO ADECUADO DE LOS POLÍMEROS RECICLADOS COMO ADITIVO	108
4.2.1.	OBTENCIÓN DE POLÍMEROS RECICLADOS PARA EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	108
4.2.2.	COSTO DE LA OBTENCIÓN DEL ADITIVO	110
4.2.3.	CÁLCULO DEL CBR CON ADICIÓN CON ADITIVO	112
4.2.4.	DIFERENCIAS OBTENIDAS ENTRE EL USO DEL ADITIVO DE LOS POLÍMEROS RECICLADOS	117
4.2.5.	EFFECTO EN EL ESPESOR Y EL COSTO DEL PAVIMENTO.....	119
4.2.6.	PROPUESTA PARA COLOCACIÓN DE BASE GRANULAR CON ADICIÓN DE FIBRA DE POLÍMERO RECICLADO EN CAMPO	128

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
5.1. CONCLUSIONES	131
5.2. RECOMENDACIONES	132
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXOS	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades y ensayos de los suelos de mayor uso en ingeniería de pavimentos.	13
Tabla 2. Propiedades fundamentales capas granulares.....	19
Tabla 3. Tipo de material y tamaño de las partículas.	20
Tabla 4. Índice de plasticidad.....	23
Tabla 5. Equivalente de arena.	24
Tabla 6. Índice de grupo y suelo de subbase.	25
Tabla 7. Clasificación de suelos AASHTO y ASTM.....	26
Tabla 8. Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador (parte 1).....	30
Tabla 9. Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador (parte 2).....	31
Tabla 10. Rango de cemento requerido en estabilización suelo cemento.	35
Tabla 11. Tiempos establecidos y requeridos para humedecimiento de especímenes.	53
Tabla 12. Índice de CBR.	63
Tabla 13. Métodos de compactación (proctor modificado).	85
Tabla 14. Penetraciones a considerar en el ensayo.	91
Tabla 15. Presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón.	93
Tabla 16. Resumen del contenido de humedad.	97
Tabla 17. Resultados de la granulometría muestra 1.	98
Tabla 18. Resultados de la granulometría muestra 2.	99
Tabla 19. Resultados de la granulometría muestra 3.	100
Tabla 20. Resultados de la granulometría muestra 4.	101
Tabla 21. Resultados de la granulometría muestra 1, 2, 3 y 4.	102
Tabla 22. Contenido del porcentaje por material.	103
Tabla 23. Clasificación de suelos.....	104
Tabla 24. Resultados de proctor.	104
Tabla 25. Resumen del ensayo CBR de la muestra patrón.....	106
Tabla 26. Costo unitario de la producción artesanal de fibra por kilogramo.....	110
Tabla 27. Costo unitario de la producción industrial de fibra por kilogramo.	111
Tabla 28. Tabla de dosificación de polímeros reciclados.	112
Tabla 29. Tabla resumen de resultados de CBR, para diferentes porcentajes de adición de fibra.	113
Tabla 30. Diseño de pavimentos de la primera alternativa, muestra patrón.	126
Tabla 31. Diseño de pavimentos de la segunda alternativa, muestra patrón.	127

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Secciones transversales de diversos tipos de pavimento.	9
Ilustración 2. Interpretación de la curva granulométrica.	22
Ilustración 3. Triángulo de graduación.	29
Ilustración 4. Equipo para ensayo de proctor modificado.	43
Ilustración 5. Molde de proctor.	54
Ilustración 6. Molde y trípode de CBR.	56
Ilustración 7. Determinación del valor de la reacción de soporte en el laboratorio.	61
Ilustración 8. Índice de CBR.	64
Ilustración 9. Gráfica de esfuerzo-penetración de muestras de CBR. Ejemplo del manual de ensayos.	65
Ilustración 10. Croquis de ubicación de la urbanización Los Eucaliptos.	73
Ilustración 11. Plano de la distribución de manzanas de la urbanización Los Eucaliptos.	74
Ilustración 12. Plano de ubicación del proyecto urbanización Los Eucaliptos.	76
Ilustración 13. Localización de la zona de muestra.	76
Ilustración 14. Preparación del material para la muestra patrón.	94
Ilustración 15. Compactado del molde de CBR con 10, 25 y 56 golpes.	94
Ilustración 16. Pesado del mol de CBR, muestra compactada 56 golpes.	95
Ilustración 17. Colocación del trípode para ensayo de expansión.	95
Ilustración 18. Colocación de los moldes de CBR en la poza para ensayo de expansión.	96
Ilustración 19. Preparación de la prensa de CBR para el ensayo de penetración, con apoyo del técnico de Doset.	96
Ilustración 20. Curva granulométrica muestra 1.	99
Ilustración 21. Curva granulométrica muestra 2.	100
Ilustración 22. Curva granulométrica muestra 3.	101
Ilustración 23. Curva granulométrica muestra 4.	102
Ilustración 24. Curva granulométrica muestra 1, 2, 3 y 4.	103
Ilustración 25. Curva de proctor de la muestra patrón.	105
Ilustración 26. A) Penetración a 0.10 pulgadas. B) Penetración a 0.20 pulgadas. C) Determinación del CBR al 95% de la DMS.	107
Ilustración 27. Obtención del aditivo PET con el uso de cizalla de papel.	109
Ilustración 28. Obtención del aditivo PET con el uso de cepillo de madera.	109
Ilustración 29. Pesado de la fibra para mezcla.	112
Ilustración 30. Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 2 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.	114
Ilustración 31. Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 3 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.	114
Ilustración 32. Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 4 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.	115
Ilustración 33. Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 5 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.	115
Ilustración 34. Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 2 a 5 centímetros, al 95% MDS.	116
Ilustración 35. Costo en la capa de subbase con aditivo y sin él, para una longitud de 200 ml y un ancho de 5.20 m, pavimento flexible.	124
Ilustración 36. Costo de la losa con base sin aditivo y con él para una longitud de 200 ml y un ancho de 5.20 m, pavimento rígido.	125

LISTA DE FIGURAS

Imagen 1. rasco típico y símbolo de reciclaje PET.	67
Imagen 2. Frasco típico y símbolo de reciclaje HDPE.	67
Imagen 3. Frasco típico y símbolo de reciclaje V.....	68
Imagen 4. rasco típico y símbolo de reciclaje LDPE.....	69
Imagen 5. Frasco típico y símbolo de reciclaje PP.	69
Imagen 6. Frasco típico PS.	70
Imagen 7. Símbolo de reciclaje "Other".	70

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 del valor de California Bearing Ratio (CBR) de suelos granulares usados en pavimentos.

Para ello, se tomó como muestra de ensayo parte del material que se utilizó como subbase del pavimento de la vía de acceso a una nueva urbanización, Los Eucaliptos, construida por la empresa Los Portales en el distrito de Saños Grande, El Tambo, Huancayo, Junín. Las muestras se obtuvieron del material de cantera. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos y materiales de la empresa Doset Perú.

Para elegir el tipo de estabilizador, el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, en su “Manual de pavimentos: suelos, geología, geotecnia y pavimentos” (2013), cuenta varios tipos de estabilizadores que recomienda según se adapten las características del suelo a mejorar. Sin embargo, el objetivo de esta tesis es optar por uno nuevo, el mejoramiento con los polímeros reciclados PET.

Para determinar la dosificación adecuada de polímeros reciclados, se realizaron ensayos de CBR, para encontrar la dosificación óptima en porcentaje y el material adecuado para la estabilización. Para ello, se realizaron 73 ensayos CBR sobre la muestra patrón y, luego, variando el porcentaje de fibra de polietileno reciclado con respecto al peso seco del suelo y las dimensiones de los polímeros.

ABSTRACT

The aim of this research is to add value to the polymer obtained from recycled PET disposable bottles (polyethylene terephthalate), for use as an additive to improve the value of CBR California support granular soils used in pavements. .

For which it was taken as a test sample of the material was used as pavement subbase path to the new urb. Eucalyptus built by the company Los Portales, in the district of healthy Grande - El Tambo -Huancayo - Junín; samples were obtained from quarry material; assays were performed in the laboratory of soil and materials company DOSET PERU.

In order to choose the type of stabilizer, MTC (2013) "Manual pavement: soil, geology, geotechnical and pavement," says various types of stabilizers recommended for use as soil characteristics to improve fit, but the goal of this thesis is to opt for a new one, improved with recycled PET polymers.

In order to determine the proper dosage of recycled polymers it had to perform CBR tests so we can find an optimal dosage rate and suitable material for stabilization, for which 73 CBR tests carried out on the standard sample and then varying were made the percentage of recycled polyethylene fiber on dry soil weight and size of the polymers.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras han sido durante mucho tiempo el principal medio de desplazamiento de personas y mercancías. Posibilitaron la integración y la globalización entre los países del mundo. Dada la importancia de las carreteras para el desarrollo de un país, es fundamental que estas permitan una circulación segura, cómoda y fluida del tráfico a un costo razonable. De lo contrario, las deficiencias que presenta una carretera se traducen en retrasos en el tráfico, en deterioro de los vehículos y en costos asumidos por los usuarios de la carretera. Esto, a su vez, se traduce en una disminución en el cumplimiento del objetivo de servicio de la carretera, que afecta el desarrollo y progreso de las regiones que comunica.

La cantidad y la calidad de la infraestructura vial incide en la economía, pues al alto costo de construcción, mantenimiento o rehabilitación hay que adicionarle también los costos que se derivan por el mal estado de las vías. Por eso, los ingenieros que se dediquen a esta rama de la profesión se enfrentarán a un reto muy importante: proporcionar estructuras de pavimentos eficaces con presupuestos cada vez más razonables. En el diseño de pavimentos se acepta que el dimensionamiento de estas estructuras permite que se establezcan las características de los materiales de las distintas capas del pavimento y los espesores, de manera que el pavimento mantenga un “índice” de servicio aceptable durante la vida de servicio estimada¹. El espesor de las capas granulares se relacionan con el valor de su módulo elástico de cada capa aportante. Si se incrementa el módulo elástico de alguna de las capas por la adición de algún material, esta tendría efectos en su comportamiento mecánico y en el costo.

El desempeño de las carreteras durante su vida de servicio depende de la realización de un adecuado diseño de su estructura de pavimento que considere factores básicos como el tráfico, las características de los suelos de la subrasante, la calidad de los materiales de las capas y el clima de la zona. La calidad de las capas de pavimentos es uno de los factores importantes. Entre ellas se encuentran las capas granulares, que aportan en gran medida al comportamiento estructural del pavimento.

Hoy, a la hora de construir un pavimento, nos encontramos con suelos de poca capacidad portante y con alta inestabilidad volumétrica, lo que hace que el material de corte sea eliminado en gran parte o en su totalidad. A la vez, se tiene que traer material de préstamo para los rellenos de la vía. Esto incrementa en gran medida el costo de construcción de los pavimentos.

¹ www.monografias.com/trabajos13/pafle/pafle.shtml

Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar los suelos en la construcción eran empíricos y, como las demás actividades artesanas, se transmitían de generación en generación. Los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan, principalmente, en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación. Los suelos pueden ser mejorados con aportaciones de otros suelos o por medio de otros elementos (por ejemplo, cemento, cal, cloruro de sodio). El costo de la estabilización puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir no posee determinadas condiciones.

En la presente investigación, se quiere aportar un elemento más para mejorar la capacidad portante e inestabilidad volumétrica de los suelos gravosos usados para formar la subbase de pavimentos. Para ello, utilizaremos fibras de polímeros, aprovechando la gran cantidad con que se cuenta hoy en el país. Así, contribuimos a la reutilización de materiales descartables.

Una necesidad de todas las poblaciones, tanto urbana como rural, es la vía de comunicación terrestre en buenas condiciones, que mejoren la calidad de vida de los habitantes, faciliten sus intercambios comerciales, mejoren su competitividad, promocionen el turismo, entre otros. Los pavimentos, sean rígidos o flexibles, dependen de las capas que la componen para clasificarlos como buenos o malos. Así, cada una de las capas que las componen debe cumplir las funciones para las cuales están diseñadas.

Cuando hablamos de subbase, solo una de las capas que compone el pavimento, el material usado en él, debe cumplir ciertos estándares normados para asegurar la estabilidad y durabilidad que garantice geotécnicamente el comportamiento de la estructura del pavimento. Si no cumple con estos estándares, tenemos dos opciones. La primera es buscar otras canteras cercanas. Si no las hubiera, la segunda opción es mejorar el material con el que contamos para economizar y disminuir el impacto ambiental.

Por ello, en la presente investigación se estudió un nuevo método de estabilización con material reciclable, como las botellas descartables PET y así darle un valor agregado a estas. Según la organización Manos Productivas, Villa El Salvador, en el Perú se produce como residuos aproximadamente 140 mil kilos de botellas de plástico por día. Esta cantidad representa más de 4 millones de botellas, pero solo se recicla el 20% y el resto se deposita en botaderos, ríos y lagos, lo que genera un impacto ambiental.

En el primer capítulo, se realiza el planteamiento de la investigación en que se considera la problemática, los objetivos, la justificación, la delimitación de la investigación y la formulación de la hipótesis, los que se corroboran tras realizar la presente investigación.

En el segundo capítulo, se describen los antecedentes internacionales y nacionales con respecto a algunos métodos similares que son utilizados para estabilizar suelos de subbase con baja capacidad portante. Algunos están normados por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC). En las bases teóricas se tocan puntos fundamentales para la investigación como: subbase, estabilizaciones de suelos y polímeros reciclados PET. En este capítulo, se describe también de forma teórica todos los ensayos utilizados para el desarrollo de la investigación, para lo cual se tomó como referencia la normatividad del MTC.

En el tercer capítulo, “Metodología y recolección de datos”, se detalla la metodología que se seguirá en el proyecto y se describen los pasos a seguir para alcanzar los objetivos que se plantean en el primer capítulo.

En el cuarto capítulo, “Resultados y análisis”, se resumen todos los ensayos realizados para determinar la dosificación óptima de los polímeros reciclados. En el ensayo que nos ayudó a determinar la dosificación CBR (California Bearing Ratio-MTC E 132-2016), se generaron cuadros que nos permiten apreciar y analizar los resultados del estudio.

En el quinto capítulo se describen todas las conclusiones a las que se llegó con la elaboración del proyecto de investigación. De igual manera, se recomiendan algunos puntos para que puedan seguir investigando en temas relacionados a esta tesis. Por último, se detalla toda la bibliografía utilizada para la elaboración de la investigación y se anexa los resultados de los ensayos en laboratorio.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia, el hombre ha intentado aprovechar de la mejor manera los materiales disponibles a su alrededor. El suelo, uno de los elementos más utilizados por el hombre, no se ha quedado atrás en este intento por encontrar un material final con mejores características. Así, encontramos intentos de “suelo reforzado” desde los inicios de la civilización.

Existen pruebas del uso de troncos para estabilizar suelos arcillosos o pantanosos, o intentos por construir taludes con una mayor pendiente usando fibras naturales o vegetación como refuerzo. Sin embargo, el desarrollo de fibras sintéticas posibilitó un mayor desarrollo de esta aplicación, pues ofrecían una ventaja muy importante: las fibras naturales utilizadas eran propensas a la biodegradación por parte de la matriz donde se encontraba, mientras que las fibras fabricadas a base de polímeros presentaban una resistencia mucho mayor.

A mediados de 1800 se desarrollan los primeros polímeros sintéticos. Un polímero es una macromolécula (generalmente orgánica) formada por la unión de moléculas más pequeños llamados monómeros. Los polímeros más conocidos son más usados hoy. Podemos mencionar el nylon, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno, etcétera.

En la actualidad, debido a la gran cantidad de polímero, la opción de reciclar este material viene siendo una actividad muy importante, además de ser un material considerado como sinónimo de resistencia mecánica y térmica. Hoy, a la hora de construir un pavimento, nos encontramos con suelos de poca capacidad portante y con alta inestabilidad volumétrica, lo que hace que el material de corte sea eliminado en gran parte o en su totalidad y, a la

vez, se tiene que traer material de préstamo para los rellenos de la vía. Esto genera que se incremente en gran medida el costo de construcción de los pavimentos.

Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar los suelos en la construcción eran empíricos y, como las demás actividades artesanales, se transmitían de generación en generación. Los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan, principalmente, en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación.

Los suelos pueden ser mejorados mediante aportaciones de otros suelos o por medios de otros elementos (por ejemplo, cemento, cal, cloruro de sodio). El costo de la operación puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir no posee determinadas condiciones.

En la presente investigación se quiere aportar un elemento más para mejorar la capacidad portante e inestabilidad volumétrica de los suelos gravosos usados para conformar la subbase de pavimentos, para lo cual se utilizarán fibras de polímeros, aprovechando la gran cantidad con que se cuenta hoy en el país. Así, contribuimos a la reutilización de materiales descartables.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

¿Cuál es el efecto de la adición de fibra de polímeros reciclados en el valor del CBR de suelos granulares en pavimentos?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cuál es el efecto en la máxima densidad seca MDS de suelos granulares por la adición de fibra de polímeros reciclados?

¿Cuál es el efecto en el óptimo contenido de humedad OCH del suelo granular por la adición de fibra de polímeros reciclados?

¿Cuál es el efecto de la adición de fibra de polímeros reciclados en el valor de CBR de suelos granulares?

¿Cuál es el efecto de la adición de fibra de polímeros reciclados con diferentes adiciones en el valor de CBR de suelos granulares?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la adición de fibra de polímeros reciclados en el valor del CBR de suelos granulares en pavimentos.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar el efecto en la máxima densidad seca MDS de suelos granulares por la adición de fibra de polímeros reciclados.

Determinar el efecto en el óptimo contenido de humedad OCH del suelo granular por la adición de fibra de polímeros reciclados.

Determinar el efecto de la adición de fibra de polímeros reciclados en el valor de CBR de suelos granulares.

Determinar el efecto de la adición de fibra de polímeros reciclados con diferentes adiciones en el valor de CBR de suelos granulares.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El consumo en el Perú de botellas descartables PET es de 140 mil kilogramos por día (4 millones de botellas), según la organización Manos Productivas del distrito de Villa El Salvador, Lima. El PET es un material duro de degradar, demora de 500 a 700 años en degradarse. Entre sus propiedades principales tenemos que son irrompibles, no tóxicas, resistentes a esfuerzos permanentes y al desgaste, lo que lo convierte en un material propicio para su uso en el mejoramiento de suelos gravosos. Con la adición de polímeros reciclados PET, se pretende mejorar las propiedades físicas mecánicas del suelo gravoso y lograr un menor costo en la construcción de pavimentos.

1.5. DELIMITACIÓN

1.5.1. GEOGRÁFICO

La presente investigación se realizará en el tramo de pavimentación del acceso a la urbanización Los Eucaliptos, vía que comunica a la carretera Catalina Huanca, proyecto de urbanización de Los Portales.

1.5.2. TIEMPO

Se realizará de abril a junio del presente año.

1.6. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.6.1. HIPÓTESIS GENERAL

La adición de fibra de polímeros reciclados incrementa el valor del CBR de suelos granulares en pavimentos.

1.6.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

La adición de fibra de polímeros reciclados tiene efectos en la máxima densidad seca MDS de suelos granulares.

La adición de fibra de polímeros reciclados tiene efectos en el óptimo contenido de humedad OCH del suelo granulares.

La adición de fibra de polímeros reciclados tiene efecto en el valor de CBR de suelos granulares.

La adición de fibra de polímeros reciclados con diferentes adiciones tiene efecto en el valor de CBR de suelos granulares.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Las carreteras han sido durante mucho tiempo el principal medio de desplazamiento de personas y mercancías. Han posibilitado la integración y la globalización actual entre los países del mundo. Dada la importancia de las carreteras para el desarrollo de un país es fundamental que estas permitan una circulación segura, cómoda y fluida del tráfico a un costo razonable. De lo contrario, las deficiencias que presenta una carretera se traducen en retrasos en el tráfico, deterioro de los vehículos y costos que son asumidos por los usuarios de la carretera. Esto, a su vez, se traduce en una disminución en el cumplimiento del objetivo de servicio de la carretera que afecta el desarrollo y progreso de las regiones que comunica.

El desempeño de las carreteras durante su vida de servicio depende de la realización de un adecuado diseño de su estructura de pavimento que considere factores básicos como el tráfico, las características de los suelos de la subrasante, la calidad de los materiales de las capas y el clima de la zona. Siendo uno de los factores importantes la calidad de las capas de pavimentos entre las que se encuentra las capas granulares que aportan en gran medida al comportamiento estructural del pavimento.

Estas capas granulares pueden ser tratadas o sin tratar. Las capas granulares tratadas son capas mejoradas que presentan un mejor comportamiento y respuesta a la aplicación de cargas, pues han sido estabilizadas mediante la adición o incorporación de un elemento adicional. Existen hoy diversos métodos para la estabilización de capas granulares como estabilización de suelos con cal, con cal y ceniza volante, con cemento, con asfalto, con emulsión asfáltica, con asfalto espumado y combinación de estabilizantes, entre otros.

Sin embargo, existen pocas investigaciones sobre el uso de materiales reciclables que además de aportar en la estabilidad pueden contribuir a la protección del medioambiente. La presente tesis se basa en las investigaciones realizadas sobre materiales similares mencionados a continuación:

2.1.1. ANTECEDENTE INTERNACIONAL

Valle (2010). “Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos”. Esta tesis de maestría menciona acerca de la estabilización con cal mezclado con fibras fibriladas de polipropileno en arcillas con alto contenido de sulfates. La adición de cal a la arcilla hace que disminuya el índice de plasticidad y las fibras se utilizan para mejorar la resistencia del suelo y reducir su retracción. Mezclar fibras de polipropileno con cal reduce la cantidad de cal necesaria. Las fibras incrementan la resistencia al corte del terreno y la cal mejora las características plásticas, por lo que la combinación de cal y fibras permite la reducción de cal necesaria para estabilizar el terreno. Al adicionar menos cal al suelo arcilloso, se reduce así la formación de etringita. Así, se eliminará o reducirá a niveles no problemáticos la patología por ataques por sulfates.

López, Hernández, Horta, Coronado y Castaño (2010). “Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas”. Aquí se investigan las arcillas expansivas que sufren cambios de volumen debido a las variaciones en su humedad adquirida por capilaridad y/o por infiltración. El estudio utiliza un poliuretano que comúnmente se aplica para sellado de grietas en la construcción. Este polímero se aplica en la estabilización de cambios volumétricos de suelos expansivos. Las pruebas muestran que la mezcla suelo-polímero reducen la expansión aproximadamente 40%, respecto a la del suelo natural.

El desecho de PET se cataloga como un producto resistente que no se ve afectado por humus, soluciones ácidas, soluciones básicas, soluciones salinas, solventes y productos químicos. Además, es resistente a las agresiones producidas por el ambiente (Crawford y otros, 2013).

2.1.2. ANTECEDENTE NACIONAL

Para la estabilización de suelos, en el “Manual de pavimentos: suelos, geología, geotecnia y pavimentos”, noveno capítulo, el MTC nos refiere algunos métodos para la estabilización para suelos con baja capacidad portante. Los principales métodos son: la estabilización mecánica de suelos, la estabilización por combinación de suelos, la estabilización por sustitución de los suelos, suelos estabilizados con cal, suelos estabilizados con cemento, suelos estabilizados con escoria, la estabilización con cloruro de sodio, la estabilización con cloruro de calcio, la estabilización con cloruro de magnesio, la estabilización con productos asfálticos y la estabilización con geosintéticos. Algunos de estos métodos serán estudiados como referencia en la presente investigación.

Mamani y Huaranca (2013). “Estabilización de suelos con fines de pavimentación mediante el uso de polímeros reciclados”. Este artículo de investigación presentado en el XXI Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil estudia tres canteras adicionando los polímeros reciclados y logrando un aumento del CBR en promedio de 28%. Las canteras estudiadas fueron suelos arenosos con presencia importante de arcilla. El porcentaje de material fino (pasante la malla 200) en promedio fue de 25%. En esta investigación recomendaron que se realice estudios en suelos limo-arcillosos.

2.2. LA MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

La aplicación de principios de la mecánica de suelos en la ingeniería de pavimentos, ya sea en el análisis de cimentaciones de pavimentos, el diseño de pavimentos completos o su evaluación estructural en servicio, ha quedado rezagada respecto al conocimiento acumulado mediante la investigación en más de medio siglo de desarrollo mundial de la ingeniería geotécnica. Esencialmente, el problema de un pavimento desde la perspectiva de la mecánica de suelos es el mismo que se da en la interacción suelo-estructura, aunque los elementos particulares pueden ser relativamente desconocidos para un ingeniero especialista en cimentaciones de edificaciones²(Brown, 1996).

Los requisitos del diseño de pavimentos son esencialmente dominados por las condiciones de servicio de la estructura. Sin embargo, el comportamiento de los materiales está también

² Ing. William Vargas Monge, Ph. D., profesor asociado de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Investigador y asesor técnico de LanammeUCR.

influido fuertemente por las condiciones y los procedimientos constructivos. El problema de los pavimentos que atañe principalmente a la mecánica de suelos es la comprensión de cómo los suelos y materiales granulares responden a la carga repetida y la aplicación de este conocimiento en el diseño, basados en un análisis teórico apropiado y una comprensión de los mecanismos de falla. Las características esfuerzo deformación no lineales de los materiales geotécnicos son un rasgo particular del problema y deben ser atendidas en el diseño y la evaluación.

A pesar del avance en la ingeniería geotécnica, los métodos de diseño de pavimentos son total o parcialmente empíricos, a menudo basados en el uso de la prueba de CBR (California Bearing Ratio o valor de soporte relativo). Varias herramientas geotécnicas están disponibles para ayudar al ingeniero de pavimentos. Estas incluyen el análisis teórico, equipos de ensayo de laboratorio, pruebas de campo y ensayos a escala real con la instrumentación adecuada. Aunque el método más empleado históricamente es, en esencia, empírico, el desarrollo de enfoques basados mecanísticamente se perfila como el futuro de los métodos de diseño de pavimentos y se prevé una mayor integración de la mecánica y la dinámica de suelos en ese proceso.

Los pavimentos son estructuras utilizadas para que los vehículos que operan con ruedas transiten de manera segura y económica. Hay una muy amplia gama de estructuras de pavimento dependiendo de la naturaleza de los vehículos que deben ser acomodados, las cargas de las ruedas implicadas y el número de cargas que se deberá soportar a lo largo de un periodo de tiempo determinado.

La figura muestra las secciones transversales de un número de diferentes tipos de pavimento que van desde caminos de tierra, grava o "afirmados" que, comúnmente se encuentran en zonas rurales o de poco desarrollo hasta pavimentos flexibles asfálticos o rígidos de concreto utilizados para tránsito pesado en las autopistas. Las vías de ferrocarril son otro tipo especial de pavimento en el que el método de transmisión de la carga al suelo difiere al de un pavimento de carretera o aeropuerto, pero para el que los principios básicos de la mecánica de suelos se aplican igualmente.

La variedad de estructuras que se observa en la figura indica, claramente, que el ámbito de la ingeniería de pavimentos es bastante amplio. Un ingrediente esencial de esta disciplina es la mecánica de suelos, pues todas las estructuras están en contacto íntimo con el suelo y en la mayoría se combinan una o más capas de material granular no estabilizado. Además, un ingeniero de pavimentos "completo" debe entender los principios de la mecánica de asfaltos, de la tecnología del concreto y de la estabilización con agentes

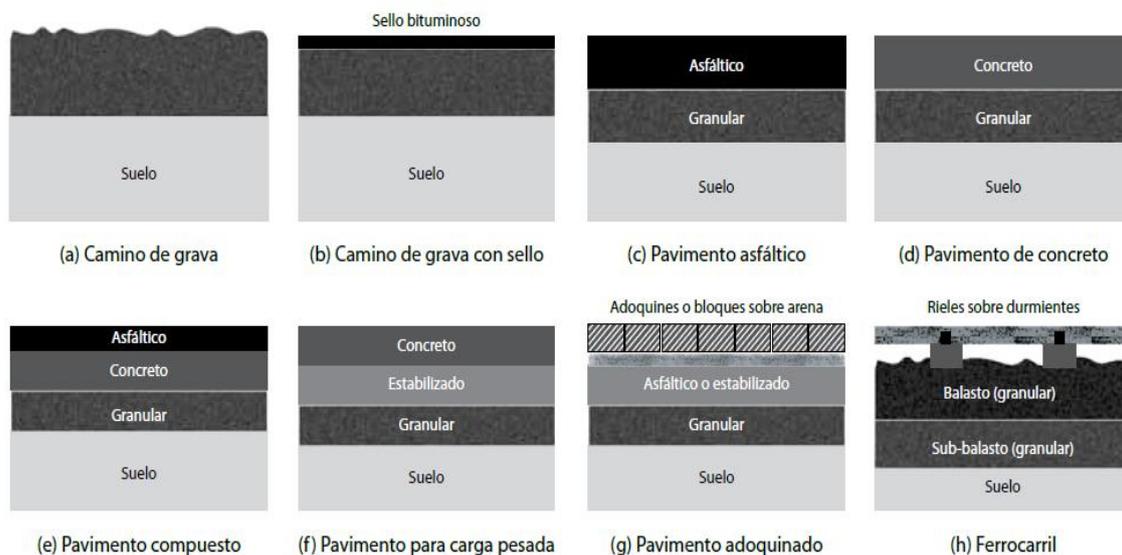
cementantes, así como las configuraciones estructurales más complejas, utilizadas en las pistas de aeropuertos o en las vías de ferrocarril³

El ingeniero debe tratar con los efectos de las cargas de vehículos, ya sea de camiones, aviones, tráfico de terminales de contenedores o de material rodante ferroviario y con la influencia del medioambiente en la estructura del pavimento, en particular, de la temperatura y el agua. El uso apropiado de geosintéticos es importante para el drenaje, la filtración, la separación de capas y el refuerzo también, así como los usos de otras técnicas de mejora del suelo como la estabilización.

Cada vez más la ocupación principal de esta profesión se está convirtiendo en la evaluación y mantenimiento de los pavimentos más que el diseño y la construcción de obras nuevas. La evaluación estructural y el diseño de tratamientos curativos son actividades en las que el papel de la mecánica de suelos, aunque no es tan significativo como en una construcción nueva, es de gran importancia y está en rápida expansión.

Ilustración 1.

Secciones transversales de diversos tipos de pavimento.



Fuente: Adaptado de Brown, 1996.

La ingeniería geotécnica o la mecánica de suelos no pretende tener influencia o abarcar todos los aspectos de ingeniería de pavimentos ni tiene un papel importante en todos ellos.

³ Cfr. Brown, 1996.

Más bien, su papel se concentra en la cimentación del pavimento, lo que, en términos generales, se define como una o más capas de material granular compactado, no cementado que se sobre el suelo de la subrasante (ilustración 2).

Dado que la interacción entre la base y la capa de concreto o material bituminoso colocado sobre ella es fundamental para el diseño del pavimento y para los procedimientos de evaluación estructurales, se requiere del conocimiento de las propiedades de los materiales y de sus mecanismos de falla. Esto permite que la aplicación de los principios de la mecánica de suelos para la cimentación se ponga en su contexto correcto.

Sin embargo, en la ingeniería de pavimentos, la construcción con materiales asfálticos domina la práctica y es, por lo tanto, el foco principal de atención. Además de ser el cimiento de los pavimentos, el suelo y otros materiales geotécnicos forman parte de la infraestructura vial y pueden estar inalterados en los cortes o remodelados en los terraplenes. Estas obras son las que predominantemente se reconocen como “geotécnicas viales”⁴

2.2.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA

Aunque los métodos de diseño y procedimientos aplicados en ingeniería de pavimentos varían un poco en todo el mundo, las características esenciales de la práctica actual son bastante comunes. El diseño actual de pavimentos tiene como antecedente una práctica esencialmente empírica que evolucionó per se en la primera mitad del siglo XX. La investigación científica y técnica se realiza desde mediados de la década de 1950 y ha extendido los conocimientos hasta un nivel de teoría “mecanística”, aplicable al diseño.

Los aspectos más relevantes de la práctica de la ingeniería de pavimentos que tienen relación con la mecánica de suelos son la filosofía de diseño, los fundamentos del análisis teórico, la evaluación y modelación de las propiedades de los materiales, la realización de pruebas de laboratorio, de campo y de experimentos a escala reducida y natural.

Un estudio de las principales fuentes de información (artículos de revistas y conferencias) sobre avances en los últimos treinta años demuestra, claramente, que

⁴ Cfr. Cooling y otros, 1961.

la mecánica de suelos para pavimentos se ha convertido en una parte muy pequeña de la ingeniería geotécnica.

Por otra parte, la investigación sobre pavimentos ha crecido en forma independiente y se ha concentrado cada vez más en los problemas asociados con el uso de las mezclas asfálticas o bituminosas. Aunque se han realizado importantes investigaciones sobre los suelos y materiales granulares para pavimentos, en general, estos no han sido publicados o discutidos en las revistas más serias o en las conferencias de mecánica de suelos más destacadas.

Es fundamental reconocer que el trasfondo de la práctica usada para la caracterización de subrasantes en el diseño de pavimentos fue desarrollado a partir de orígenes esencialmente diferentes a las de Terzhagi, Skempton, Roscoe y otros pioneros de la mecánica de suelos moderna.

Aunque los pavimentos y los ingenieros existen desde hace siglos, los primeros procedimientos de ingeniería para análisis de suelos y diseño de pavimentos se generaron y adoptaron principalmente después de la Segunda Guerra Mundial, por parte de las agencias federales de Estados Unidos (Davis, 1949). Esta etapa inicial fue seguida por un amplio programa de investigación sobre las condiciones de humedad en subrasantes, que se inspiró en la física de suelos de la agronomía (pedología) y no en la disciplina emergente de la mecánica de suelos. Croney y Coleman (1948) argumentaron que, dado que las cimentaciones (subrasantes) estaban por encima del nivel freático, las condiciones del agua son similares a los de interés para los agrónomos.

La inversión tan importante en estudios de las condiciones del agua subterránea debajo de las superficies selladas por pavimentos continuó durante unos 15 años, al parecer, al margen de los acontecimientos paralelos en mecánica de suelos. Las dos disciplinas se conocieron en la Conferencia sobre Presión de Poro y Succión en Suelos de 1960, en la que fue evidente que las diferencias de definiciones, de los parámetros usados y de la filosofía del diseño, había avanzado hasta el punto en que la reducción de la brecha era una cuestión no trivial (Cooling y otros, 1961). La aplicación del principio de esfuerzo efectivo era el problema central⁵

Otras ramas de la mecánica de suelos que tienen algo en común con pavimentos incluyen a la ingeniería sísmica, la ingeniería de cimentaciones off-shore y el diseño

⁵ Soil Thermodynamics Applied to the Movement of Moisture in Road Foundations, Proc. 7th Int. Conf. Appl. Mech., London, UK. 3, 163-177. Citado por Brown, 1996.

de cimentaciones de máquinas. En todos los casos, el tema común es la carga repetida o cíclica. Es importante señalar que el profesor Harry Seed, quien tanto contribuyó a la comprensión de la mecánica de suelos en el marco de cargas sísmicas, comenzó su interés por la carga repetida con el problema del pavimento (Seed y otros, 1955). De hecho, el término 'módulo resiliente', que será tema de otro artículo, fue sugerido por Seed.

Aparte del desarrollo independiente de investigación de la subrasante, los requisitos de mecánica de suelos para la ingeniería de pavimentos difieren significativamente de los de importancia en otras aplicaciones geotécnicas. Las diferencias esenciales pueden resumirse de la siguiente manera:

- a) El suelo y los materiales granulares de pavimentos se ubican usualmente por encima del nivel freático, pero por debajo de una superficie sellada, aunque esta no inhibe completamente la entrada de agua. Por lo tanto, en la estructura y especialmente en el suelo de subrasante se pueden presentar condiciones saturadas y no saturadas.
- b) Los suelos y materiales granulares de los pavimentos en operación son sometidos a un gran número de aplicaciones de carga con niveles de esfuerzos muy por debajo de su resistencia al corte.
- c) Cuando los pavimentos están sin terminar, el tránsito de la construcción aplica directamente a los materiales de las capas granulares esfuerzos mucho mayores que durante la operación, aunque el número de aplicaciones de carga es menor.
- d) En una sola aplicación de carga de una rueda en movimiento, una estructura de pavimento responde de una manera esencialmente resiliente. Sin embargo, bajo el efecto de las cargas repetidas los materiales pueden acumular deformaciones plásticas no recuperables (permanentes) y viscosas. Esto permite separar el análisis teórico de los pavimentos en dos partes en lugar de aplicar un solo análisis (elasto-plástico o elasto-visco-plástico) como es común para los problemas de carga monotónica en ingeniería geotécnica.

2.2.2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS: DIFERENCIAS Y CONCORDANCIAS

En virtud de la complejidad del comportamiento mecánico de los materiales que componen la estructura de un pavimento, es necesario conocer un conjunto amplio de propiedades y contar con herramientas adecuadas para su evaluación, así como para el análisis y diseño. Las propiedades de suelos y agregados estudiadas comúnmente en mecánica de suelos y los ensayos de materiales más usados desde los inicios de la ingeniería de pavimentos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1.
Propiedades y ensayos de los suelos de mayor uso en ingeniería de pavimentos.

Propiedades / Ensayos	Designación AASHTO	Aplicación	Usos principales en Ingeniería de Pavimentos
Contenido de humedad	T 265	Frecuente	Verificación de humedad de compactación
Gravedad específica	T 100	Frecuente	Cálculos de densidad y razón de vacíos. Identificación de los posibles componentes mineralógicos de suelos y agregados
Densidad in situ	T 191	Frecuente	Verificación de densidad de materiales compactados
Granulometría	T 88	Frecuente	Clasificación de suelos y aceptación de agregados
Límites de consistencia	T 89, T 90	Frecuente	Clasificación de suelos y aceptación de materiales de relleno / subrasante.
Compactación o densidad remoldeada (Proctor estándar y modificado)	T 99, T 180, T 224	Frecuente	Obtención de parámetros contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima de compactación.
Valor Relativo de Soporte o California Bearing Ratio	T 190, T 193, T 292, T 294	Frecuente	Obtención del valor de CBR en los materiales de base, sub-base y sub-rasante.
Permeabilidad	T 215	Moderado	Evaluación de materiales estructurales y de subdrenajes
Compresión inconfiada	T 208	Limitado	Evaluación de la resistencia a la compresión simple o uniaxial.
Corte Directo	T 236	Limitado	Evaluación del ángulo de fricción de suelos y materiales, especialmente arenosos
Compresión triaxial	T 296, T 297	Limitado	Evaluación de la resistencia de los suelos finos y gruesos.
Consolidación	T 216	Limitado	Evaluación del potencial de asentamientos de suelos finos.

Fuente: Adaptado de FHWA, 2005.

Con respecto al uso de los parámetros y ensayos listados en la tabla 1, se pueden agregar los siguientes comentarios:

- El ensayo de laboratorio de contenido de humedad con horno de calor es poco práctico para su uso en la verificación de humedad de compactación en el campo, pues requiere de 24 horas, por lo que ha sido sustituido por otros como el horno de microondas (AASHTO T 255, ASTM D 4643). Estos tienen limitaciones que deben ser tomadas en cuenta y verificadas.
- En los suelos de origen piroclástico (cenizas volcánica) de nuestro país se ha identificado la presencia de partículas de minerales arcillosos “amorfos” o de corto alcance como la alófana y la halloysita, que incluyen moléculas de H₂O en su estructura. En consecuencia, el secado con temperaturas superiores a 100 °C tiene consecuencias irreversibles en el comportamiento del material y no se debe aplicar a las muestras de los ensayos de granulometría por sedimentación (vía húmeda), gravedad específica y límites de consistencia.

Además, el contenido de humedad, los límites de consistencia y la humedad óptima de compactación se deben evaluar con procedimientos específicos que permitan diferenciar esta del agua vadosa (en los poros del suelo). Las normas de ASTM a la fecha han establecido excepciones solo en los ensayos de gravedad específica y límites de consistencia. La forma actual más sencilla de reconocer el problema es realizar el conjunto de ensayos con el material seco al aire y seco al horno, observando si se producen diferencias significativas en el comportamiento.

- Los ensayos de densidad in situ basados en medición de volumen desplazado han sido sustituidos por la medición a base de radiación (densímetros nucleares, ensayo AASHTO T310). Estos deben ser calibrados y recibir mantenimiento con frecuencia adecuada para dar resultados confiables y por razones de seguridad.
- La clasificación adecuada de los materiales geotécnicos es esencial para definir su posible uso en ingeniería de pavimentos. El principal uso de estos materiales es el de cimentación. Es decir, servir como subbase o subrasante.

En mecánica de suelos se favorece el uso del Sistema Unificado de Clasificación (SUCS), mientras que en ingeniería de pavimentos se prefiere el de AASHTO, que tiene un número menor de clases o tipos. Para clasificar un material, los ensayos

de granulometría y límites de consistencia son suficientes, pero no para entender y predecir mejor el posible comportamiento y problemática.

Se pueden identificar algunos problemas específicos: los suelos arenosos licuables a base de la granulometría, los limos “colápsales” y los suelos arcillosos expansivos a base de los límites de consistencia.

- Desde la perspectiva de la mecánica de suelos, los valores obtenidos en el ensayo de compactación de laboratorio son solo dos propiedades físicas (contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima) significativas, pero no las más importantes. Sin embargo, en la ingeniería de pavimentos se convirtieron en la referencia principal de las especificaciones técnicas para la verificación de los efectos de la compactación en el campo. Existe poca integración en la práctica de la investigación de los efectos de la compactación y de los cambios posteriores de humedad o grado de saturación sobre las propiedades de mayor importancia e interés desde la perspectiva de la mecánica de suelos, como la resistencia, la rigidez y la permeabilidad.

Como confirmación de la importancia en la ingeniería geotécnica, existe un gran número y variedad de ensayos para la evaluación de esas propiedades in situ, según los tipos de obra y las aplicaciones involucradas. Las técnicas abarcan desde la generación y el registro de la propagación de ondas elásticas hasta la penetración.

- El CBR es el parámetro de mayor uso histórico para representar el comportamiento de la subrasante en el diseño de pavimentos. Sin embargo, por ser un valor relativo, debería tener más uso como indicador que como propiedad mecánica. Por lo tanto, el diseño basado en CBR es categóricamente empírico. En el fundamento y en el procedimiento del ensayo de CBR está implícita la comparación de rigidez del material y un estándar, aunque otros aspectos o limitaciones del mismo impiden una adecuada interpretación mecánica. El CBR y los procedimientos de diseño empírico basados en este parámetro están siendo progresivamente sustituidos por el módulo resiliente (MR) y el diseño “mecánico”. Es decir, basado en propiedades mecánicas que representen comportamientos reales. Este tema será tratado en otro artículo por su importancia y alcances.
- Aunque Seed y algunos otros autores dan mucho peso en la mecánica de suelos, han sugerido el uso cuidadoso del ensayo de compresión sin confinar

para obtener valores de módulo elástico, con el cual el resiliente guarda estrecha relación. Su uso en la ingeniería de pavimentos se ha limitado al estudio de las mejoras de resistencia en los materiales estabilizados con cemento y cal.

2.3. BASES TEÓRICAS

2.3.1. SUBBASE

Es la capa que se encuentra entre la base y la subrasante en un pavimento asfáltico. Debido a que está sometida a menores esfuerzos que la base, su calidad puede ser inferior y, generalmente, está constituida por materiales locales granulares o marginales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013a).

El material que se coloca entre la subrasante y las losas de un pavimento rígido también se denomina 'subbase'. En este caso, debe permitir el drenaje libre o ser altamente resistente a la erosión para prevenir el bombeo. En algunas partes, a esta capa la llaman 'base'.

Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular ($\text{CBR} \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento.

Para el diseño de pavimentos, se consideran cuatro factores importantes:

El primer factor 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 tiene 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 base, subbase y 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 flexible o rígido. 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 este⁶ (Montejo Fonseca, 2010).

2.3.2. FUNCIONES DE LA CAPA GRANULAR DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

Función económica

Una de las funciones principales de esta capa es netamente económica. En efecto, el espesor total que se requiere para que el nivel de esfuerzos en la subrasante sea igual o menor que su propia resistencia puede ser construido con materiales de alta calidad. Sin embargo, es preferible disminuir las capas más calificadas en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad, la cual es frecuentemente la más barata. Esta solución puede aumentar el espesor total del pavimento y, no obstante, resultar más económica.

Capa de transición

La subbase bien diseñada impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante y, por otra parte, actúa como filtro de la base impidiendo que los finos de la subrasante la contaminen menoscabando su calidad.

Disminución de las deformaciones

Algunos cambios de la capa subrasante, generalmente asociados a cambios de su contenido de agua (expansiones) o a cambios extremos de temperatura (heladas), pueden absorberse con la capa subbase, impidiendo que estas deformaciones se reflejen en la superficie de rodamiento.

⁶ Cfr. Montejo, 2010.

Resistencia

La subbase debe soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos a través de las capas superiores y transmitidas a un nivel adecuado a la subrasante.

Drenaje

En muchos casos la subbase debe drenar el agua, que se introduzca a través de la carpeta o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar.

Montejo (2010) afirma:

Con frecuencia el ingeniero debe enfrentarse con suelos que debe 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 subbase 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)⁷ (Menéndez Acurio, 2009).

⁷ Cfr. Menéndez Acurio, 2009.

Tabla 2.
Propiedades fundamentales capas granulares⁸

Ensayo	Norma INV	Subbase granular	Base granular
Desgaste de Los Ángeles (%)	E-218	50 máx	35 máx
Desgaste Micro-Deval (%)	E-238	30 máx	25 máx
Resistencia en prueba de 10% de finos (KN)	E-224	-	90 máx
Terrones de arcilla y partículas deleznableles (%)	E-211	2 máx	2 máx
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio (%)	E-220	12 máx	12 máx
Límite líquido	E-125	40 máx	-
Índice plástico	E-126	6 máx	NP
Equivalente de arena	E-133	25 máx	30 máx
Valor de azul	E-235	-	10 máx
Índices de alargamiento y aplastamiento	E-230	-	35 máx
Partículas con una cara fracturada mecánicamente (%)	E-227	-	60 máx
Angularidad de la fracción fina	E-239	-	35 máx
CBR	E-148	30 máx	100 máx

a. Granulometría

El análisis granulométrico de un suelo pretende 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 son la compacidad y la angulosidad de los granos. Evidentemente, cualquier análisis por mallas no da ninguna información sobre estos aspectos, pero sí dan una referencia acerca de las distribuciones granulométricas (Rico A. 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

⁸ Cfr. MTC, 2014.

materiales del suelo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013b).

Según el tamaño de las partículas de suelo, se puede denominar así según la tabla 3.

Tabla 3.
Tipo de material y tamaño de las partículas.

Grava		75 mm-4.75 mm
Arena	Arena gruesa	4.75 mm-2.00 mm
	Arena media	2.00 mm-0.425mm
	Arena fina	0.425 mm-0.075 mm
Material fino	Limo	0.075 mm-0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Fuente: MTC, 2013b.

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.
- 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'.

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 los diámetros efectivos por donde pasa el 60% y 10%.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Donde:

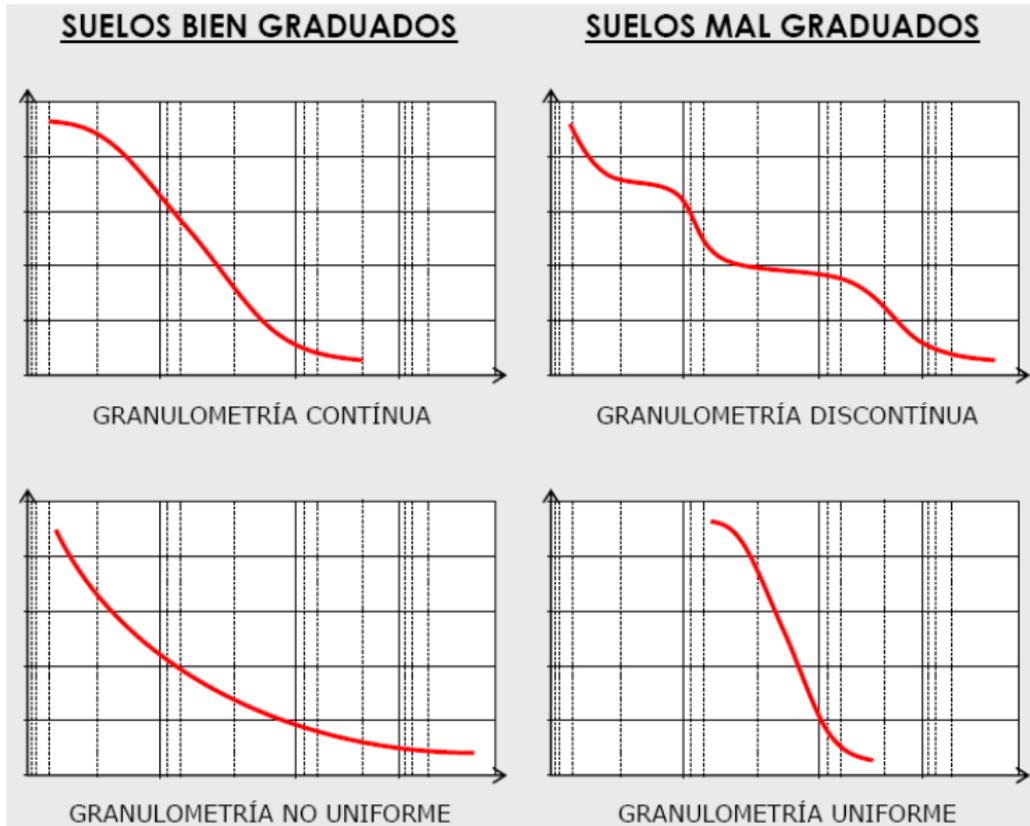
Dx: Es la abertura del tamiz o diámetro efectivo (mm) por donde pasa el X% en peso de la totalidad de la muestra de suelo analizada.

En pavimentos es importante que el suelo esté bien graduado para que, al compactarlo, las partículas más finas ocupen los huecos que dejan los de mayor tamaño, reduciendo así el número de huecos y alcanzando una mayor estabilidad y capacidad portante. Un suelo bien graduado presenta valores de Cc comprendidos entre 1 y 3.

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. En la ilustración 1 se aprecia el comportamiento de las distribuciones granulométricas con una comparación entre los suelos bien y mal graduados.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Ilustración 2.
Interpretación de la curva granulométrica.



Fuente: Bañón y Beviá García, s. f.

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 (Das, 2001).

El límite líquido se determina mediante el método de la copa de Casagrande. El ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que pueda contener una pasta formada por 100 gramos de suelo seco pasante la malla 40. Casagrande (1932) concluyó que cada golpe en un depósito estándar para límite líquido corresponde a una resistencia cortante del suelo de aproximadamente 1 g/cm². 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 g/cm². El límite líquido se toma como el valor de la humedad, para el cual la cohesión es aproximadamente 2 KPa (Kraemer, Pardillo, Rocci y Romana, 2009).

El límite plástico se define como el contenido del agua en porcentaje con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo (Das, 2001). El límite plástico corresponde al valor de la humedad, para el cual la cohesión es aproximadamente 200 KPa (Kraemer y otros, 2004).

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.

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 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

En la tabla 4 se puede caracterizar a un suelo en función del índice de plasticidad.

Tabla 4.
Índice de plasticidad.

índice de plasticidad	Plasticidad	Característica
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, 2013b.

c. 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 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

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 5.
Equivalente de arena.

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

Fuente: MTC, 2008a.

d. Índice de grupo

Es un índice adoptado por AASHTO de uso corriente para clasificar suelos. Se basa, en gran parte, en los límites de Atterberg (Das, 2001). Das menciona que, para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de pavimentos, se incorpora también un número llamado índice de grupo (IG). El índice de grupo está dado por la siguiente fórmula:

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

Donde:

F: Por ciento que pasa la malla 200

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 (Das, 2001).

MDBT-MTC (2008a) 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 pavimentos. En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material para subbase es inversamente proporcional al IG. En la tabla 6 se puede categorizar la calidad del suelo de subbase en función del valor del IG, para lo cual nos dan un rango de valores.

Tabla 6.
Índice de grupo y suelo de subbase.

Índice de grupo	Suelo de subbase
IG > 9	Muy pobre
IG está de 4 a 9	Pobre
IG está de 2 a 4	Regular
IG está de 1 a 2	Bueno
IG está de 0 a 1	Muy bueno

Fuente: MTC, 2008a.

e. Humedad natural

Otra característica importante de los suelos es su humedad natural, pues la resistencia de los suelos de subbase, 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. Si 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 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013b).

f. Clasificación de los suelos

“Una adecuada y rigurosa clasificación permite al ingeniero de pavimentos tener una primera idea acerca del comportamiento que cabe esperar de un suelo como cimiento del firme” (Bañón, 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.

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.

A continuación, en la tabla 7 se presenta una correlación de los dos sistemas de clasificación más difundido AASHTO y ASTM:

Tabla 7.
Clasificación de suelos AASHTO y ASTM.

Clasificación de suelos AASHTO	Clasificación de suelos ASTM
A-I-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM
A-I-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, 2008a.

g. Ensayos CBR (California Bearing Ratio)

El CBR es un ensayo de prueba semiempírica para evaluar la calidad de un material de suelo a base de su resistencia al corte. El índice de CBR se define como la relación entre la presión necesaria para que el pisón penetre al suelo una determinada profundidad y la necesidad para conseguir esa misma penetración en una muestra patrón de grava machacada, expresada en tanto por ciento⁹ (Bañón y Beviá García, 2000).

La capacidad portante de una subbase se define como la carga que este es capaz de soportar sin que se produzcan asientos excesivos. El indicador para cuantificar es el índice CBR.

Una vez que se hayan clasificado los suelos por el sistema AASHTO para pavimentos, se elaborará un perfil estratigráfico para cada sector homogéneo a partir del cual se determinará los suelos que controlarán el diseño y se establecerá el programa de ensayos y/o correlaciones para establecer el CBR que es el valor soporte o resistencia del suelo, referido al 95% de la MDS (máxima densidad seca) y a una penetración de carga de 2.54 mm (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013b).

2.3.3. 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 subbase inadecuado o pobre. En este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013b).

La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos de resistencia mecánica y permanencia de estas 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.

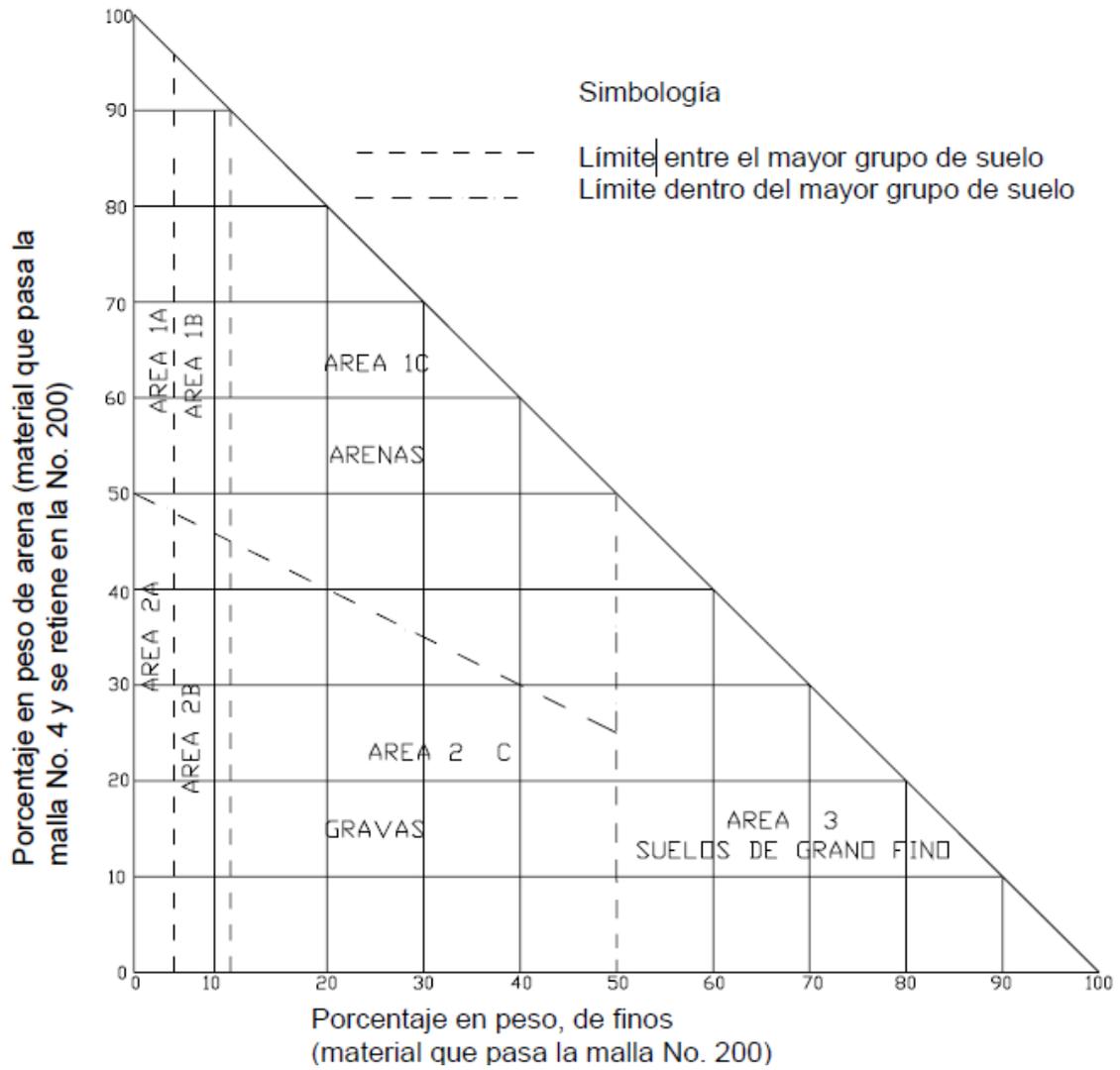
⁹ Cfr. Bañón y Beviá García, 2000.

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

- Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente.
- 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 8 nos muestra la clasificación por área. Esto se consigue del triángulo de gradación obtenido de las intersecciones del porcentaje fino que pasa la malla 200 y el porcentaje de arena (pasante malla 4 y retenido en la malla 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.

Una vez seleccionado el tipo de estabilizador, la tabla 9 nos resume algunas sugerencias para aplicar el tipo de estabilizador seleccionado.

Ilustración 3.
Triángulo de graduación.



Fuente: Garnica y otros, 2002.

Tabla 8.
Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador (parte 1)

Área	Clase de suelo	Tipo de estabilizador recomendado	Restricción en II y ip del suelo	Restricción en el porcentaje que pasa la malla 200	Observaciones
1 A	SW o SP	(1) Asfalto			
		(2) Cemento Portland			
		(3) Cal-cemento-cenizas volantes	IP no excede de 25		
1 B	SW - SM o SP - SM o SW - SC o SP - PC	(1) Asfalto	IP no excede de 10		
		(2) Cemento Portland	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 o SC o SM-SC	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	
		(2) Cemento Portland	(b)		
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-cemento-cenizas volantes	IP no excede de 25		
2 A	GW o GP	(1) Asfalto			Solo material bien graduado.
		(2) Cemento Portland			El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la malla 4.
		(3) Cal-cemento-cenizas volantes	IP no excede de 25		
2B	GW - GM o	(1) Asfalto	IP no excede de 10		Solo material bien graduado.
	GP - GM o	(2) Cemento Portland	IP no excede de 30		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la malla n° 4.
	GW - GC o	(3) Cal	IP no menor de 12		
	GP-GC	(4) Cal-cemento-cenizas volantes	IP no excede de 25		
2C	GM o	(1) Asfalto	IP no excede de 10	No debe exceder el 30% en peso	Solo material bien graduado.
	GC o	(2) Cemento Portland	(b)		El material deberá contener cuanto menos 45% en peso de material que pasa la malla 4.
		(3) Cal	IP no menor de 12		
		(4) Cal-cemento-ceniza	IP no excede de 25		
3	CH o CL o MH o ML o OH o OL o 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		
IP = Índice plástico (b) IP 20 + (50 – porcentaje que pasa la malla 200) / 4				Sin restricción u observación. No es necesario aditivo estabilizador	Fuente: US Army Corps of Engineers.

Tabla 9.
Guía referencial para la selección del tipo de estabilizador (parte 2)

TIPO DE ESTABILIZADOR RECOMENDADO	NORMAS TÉCNICAS	SUELO (1)	DOSIFICACIÓN (3)	CURADO (APERTURA AL TRÁNSITO) (5)	OBSERVACIONES
Cemento	EG-CBT-2008 Sección 3058 ASTM C150 AASHTO M85	A-1,A-2,A-3,A-4,A-5,A-6 y A-7 LL<40% IP<= 18% CMO (2) < 1.0% Sulfatos(S04 2)<0.2% Abrasión < 50% Durabilidad S04Ca (4) - AF <= 10% -AG <= 12% Durabilidad SO4 Mg - AF <= 15% - AG <= 18%	2 -12%	7 días	Diseño de mezcla de acuerdo a recomendaciones de la PC A (Portland Cement Association)
Emulsión	ASTM D2397 o AASHTO M208	A-1, A-2 y A3 Pasante malla N5 200<= 10% IP <= 8% Equiv. Arena >40% CMO (2) <1.0% Sulfatos (S04 2) <0.6% Abrasión < 50% Durabilidad SO-4Ca (4) - AF <= 10% -AG <= 12% Durabilidad SO4 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 (2)< 3.0% Sulfatos (SO4 2) <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	ASTMD98 ASTM D345 ASTM E449 MTC E 1109	A-1, A-2, A-3 IP<= 15% CMO (2)< 3.0% Sulfatos (SO4 2) <0.2% Abrasión < 50%	1 a 3% en peso del suelo seco	24 horas	
Cloruro de Sodio	EG-CBT-2008 Sección 309B ASTME534 MTC E 1109	A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 8% <= IP <= 15% CMO (2) <3.0% Abrasión < 50%	50-80 kg/m3	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 (2)<3.0% pH: mínimo 5 Abrasión <50%	50-80 kg/m3	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 (2) No debe contener Abrasión < 50% %<N°200:10-35%	1L/30-33 m3	De acuerdo a Especificaciones del fabricante	
Aceites sulfonados		Aplicable en suelos con partículas finas limosas o arcillosas, con LL bajo, arcillas y limos muy plásticos CMO (2) <1.0% Abrasión < 50%		De acuerdo a Especificaciones del fabricante	

Fuente: US Army Corps of Engineers, citado por MTC 2013b.

2.3.3.1. 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 pavimentos: suelos, geología, geotecnia y pavimentos”. Cada tipo de estabilización se describe de forma resumida como referencia para la estabilización de la presente investigación.

a. 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.

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 Merino, 2010).

b. 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 para suplir las carencias de gravas o arenas. El suelo existente se disgregará o escarificará, en una profundidad de 15 centímetros (cm). 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 articulars mayores de 75 milímetros (mm), sí las hubiere. Luego se procederá a un mezclado de ambos suelos, se formará y compactará cumpliendo las exigencias de densidad y espesores hasta el nivel de subrasante fijado

en el proyecto (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013b).

c. Estabilización por sustitución de los suelos

Cuando se prevea la construcción de la subbase mejorada solo con material adicionado, pueden presentarse dos situaciones, sea que la capa se construya directamente sobre el suelo natural existente o que este 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 15 centímetros. 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. Estos 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, según el espesor de reemplazo (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

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 $CBR > 3\%$ y $CBR < 6\%$.

d. Suelos estabilizados con cemento

La combinación suelo cemento produce la reacción del calcio con la sílice y alúmina, produciendo compuestos silicatos y aluminatos que aumentan

lentamente la resistencia de la mezcla, conocido como la acción puzolánica (Montejo Fonseca, 2010).

El material llamado suelo-cemento se obtiene por la mezcla íntima de un suelo suficientemente disgregado con cemento, agua y otras eventuales adiciones seguidas de una compactación y un curado adecuados. Así, el material suelto se convierte en otro endurecido, mucho más resistente. A diferencia del concreto. Sin embargo, los granos de los suelos no están envueltos en pasta de cemento endurecido, sino que están puntualmente unidos entre sí. Por ello, el suelo-cemento tiene una resistencia inferior y un módulo de elasticidad más bajo que el concreto (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

El contenido óptimo de agua se determina por el ensayo proctor como en la compactación de suelos. Las propiedades del suelo-cemento dependen del tipo y cantidad de suelo, cemento y agua; ejecución; edad de la mezcla compactada y tipo de curado.

Los suelos más adecuados para estabilizar con cemento son los granulares tipos A-1, A-2 y A-3, con finos de plasticidad baja o media ($LL < 40$, $IP < 18$). La resistencia del suelo-cemento aumenta con el contenido de cemento y la edad de la mezcla. Al añadir cemento a un suelo y antes de iniciarse el fraguado, su IP disminuye, su LL varía ligeramente y su densidad máxima y humedad-óptima aumenta o disminuyen ligeramente, según el tipo de suelo (Menéndez Acurio, 2013 P).

La dosificación de cemento para suelo cemento puede fijarse aproximadamente en función del tipo de suelo, así como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10.
Rango de cemento requerido en estabilización suelo cemento.

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido porcentaje del peso de los suelos
A-I-a	3-5
A-I-b	5-8
A-2	8-9
A-3	7-11
A-4	7-12
A-5	8-13
A-6	9-15
A-7	10-16

e. Estabilización con cloruro de sodio

La desventaja de este método es que puede ser lavada por el agua, por lo cual presenta poca durabilidad en primera capa estabilizada (Montejo Fonseca, 2010).

El principal uso de la sal es como control del polvo en bases y superficies de rodadura para tránsito ligero. También se utiliza en zonas muy secas para evitar la rápida evaporación del agua de compactación. La sal es un estabilizante natural, compuesto aproximadamente por 98% de NaCl y un 2% de arcillas y limos, cuya propiedad fundamental, al ser higroscópico, es absorber la humedad del aire y de los materiales que le rodean, reduciendo el punto de evaporación y mejorando la cohesión del suelo.

Su poder coagulante conlleva a un menor esfuerzo mecánico para lograr la densificación deseada, debido al intercambio iónico entre el sodio y los minerales componentes de la matriz fina de los materiales, produciéndose una acción cementante (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

f. Estabilización con cloruro de calcio

Este producto trabaja de forma similar a la sal común, pero es preferible debido al efecto oxidante que tiene el cloruro de sodio. En todo caso, el cloruro de calcio ayuda al proceso de compactación y contribuye con la resistencia del suelo, previene el desmoronamiento de la superficie y es un paliativo del polvo.

Las características higroscópicas de este producto ayudan a mantener la humedad en la superficie del camino. Se puede utilizar de dos formas, en granos regulares o tipo I y en hojuelas o pelotillas o tipo II. La dosificación es de 1% a 2% de cloruro de calcio en peso respecto del suelo seco. El mezclado, la compactación y la terminación son similares a los de la estabilización con cloruro de sodio (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

g. Estabilización con cloruro de magnesio

El cloruro de magnesio (MgCl) es un cloruro en forma de cristales de color blanco, más efectivo que el cloruro de calcio para incrementar la tensión superficial produciendo una superficie de rodado más dura. Químicamente, el cloruro de magnesio está constituido aproximadamente por un 10.5% de magnesio, un 33.5% de cloro, un 52% de agua y un 4% de impurezas, grasoso al tacto por su gran contenido de humedad. Para el uso vial, presenta las siguientes propiedades útiles (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a):

- Higroscópica: Posee la capacidad de absorber humedad del ambiente, incluso en zonas sumamente áridas.
- Ligante: Cohesiona las partículas finas, permitiendo consolidar la carpeta de rodado.
- Resistente a la evaporación: Posee una baja tensión de vapor, lo que permite que no se pierda la humedad absorbida.
- Baja temperatura de congelamiento: -32.8 °C.

- Altamente soluble en agua: Permite elaborar una solución en forma rápida y sencilla.

La dosis de cloruro de magnesio se aplica, en una proporción de 3% a 5% en peso del suelo seco. Depende del grado de plasticidad en el material a tratar (a mayor IP, menor cantidad requerida de MgCl).

h. Estabilización con productos asfálticos

La mezcla de un suelo con un producto asfáltico puede tener como finalidad:

- Un aumento de su estabilidad por las características aglomerantes del ligante que envuelve las partículas del suelo.
- Una impermeabilización del suelo, haciéndolo menos sensible a los cambios de humedad y, por tanto, más estable en condiciones adversas. La dosificación necesaria de ligante es función principalmente de la granulometría (superficie específica) del suelo. Los suelos más adecuados son los granulares con pocos finos, de reducida plasticidad, que presentan menos del 20% que pasa la malla 200, LL < 30 e IP < 10.

El material asfáltico usualmente empleado son las emulsiones asfálticas y los asfaltos fluidificados de viscosidad media. La elección del ligante asfáltico dependerá de la granulometría del suelo, de su contenido de humedad y de las condiciones climáticas. En el caso de las estabilizaciones con emulsiones asfálticas, se emplea un emulsificante, tal como un agente químico utilizado como emulsificante y definido como tenso activo o surfactante aniónico o catiónico, que terminará la clasificación de las emulsiones como aniónicas, catiónicas o no iónicas (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2008a).

Se recomienda que el material por mejorar presente un equivalente de arena mayor de 40% y el porcentaje de emulsión varíe en un porcentaje de 1.

i. 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 (Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España, 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 (Boletín 326, 2006).

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 básicas¹⁰:

- 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

¹⁰ Cfr. Montejo Fonseca, 2010.

determinados lapsos de tiempo. Este es conocido como “acción puzolánica”.

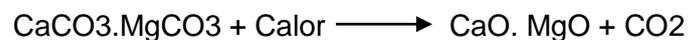
La LIME (National Lime Association), en su boletín 326, del manual de estabilización de suelo tratado con cal, explica las reacciones que sucede entre estos elementos. A continuación, se explican los puntos importantes de este manual.

a. La cal para el tratamiento de suelos

La cal es un producto compuesto de óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio que procede de la calcinación de minerales calizos y dolomíticos. También suele contener óxidos de silicio, aluminio e hierro en función del material básico de procedencia.

CaO - Ca (OH)2 - MgO - Mg (OH)2 - SiO2 - AlO2 - Fe2O3

Las reacciones químicas siguen el siguiente esquema:



b. La modificación de suelos arcillosos con cal

La adición de cal a un suelo con una fracción de partículas finas relevantes modifica su comportamiento debido principalmente a dos manifestaciones típicas. La primera es la modificación de la textura del suelo y la segunda es el incremento de su resistencia (Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España, 2002).

Estos hechos se producen en mayor o menor medida según el tipo de suelos, su granulometría y mineralogía, y el de la cal empleada, en función de su riqueza y actividad.

c. Efectos de la aplicación de la cal

c.1. Reducción de la humedad natural del suelo

Un primer efecto de la aplicación de la cal en ciertas formas a un suelo es su secado. La reacción que se produce es exotérmica. De manera orientativa, es posible evaluar la reducción de humedad de un suelo en un 2% o un 3% por la adición de un 1% de cal.

c.2. Mayor trabajabilidad:

Los efectos de estas modificaciones se traducen en una pérdida de cohesión y un incremento de rozamiento interno.

c.3. Reducción del índice de plasticidad:

Una de las principales manifestaciones de la aplicación de la cal en los suelos arcillosos es la reducción de la plasticidad. Más concretamente la aplicación de la cal provoca de manera generalizada un aumento del límite plástico sin afectar mucho al límite líquido.

- El IP en general disminuye de 15% a 20%.
- El LP aumenta 10% a 15%.
- El LL en general varía muy poco.

c.4. Reducción del potencial de cambios volumétricos

Este efecto conlleva que el tratamiento con cal de un suelo potencialmente expansivo sirve para conseguir importantes reducciones del riesgo de hinchamiento y retracción del mismo. La utilidad de este efecto es clara y de gran espectro dada la importante magnitud de los daños ocasionados en la construcción por las arcillas expansivas.

c.5. Modificación de las características de compactación

Otra consecuencia de las alteraciones granulométricas que la aplicación de la cal genera en los suelos arcillosos es la modificación de los valores

característicos que relacionan los estados de humedad del suelo y su densidad.

La redistribución de las partículas en fracciones de mayor tamaño hace que ante una misma energía de compactación sea posible obtener una menor densidad máxima

Otra consecuencia en las propiedades de compactación de la aplicación de la cal es el aumento de la humedad necesaria para conseguir la densidad máxima.

c.6. Aumento inmediato de la consistencia

La manifestación más típica de este aumento de la consistencia de un suelo es el incremento del CBR que se produce en el mismo ante el aumento de cal.

c.7. Mayor resistencia a largo plazo

El único efecto de entre los mencionados en el que interviene lo que se ha llamado la reacción puzolánica se plasma en un incremento muy importante de la resistencia de un suelo a medio o largo plazo por la aplicación de cal

2.3.3.2. Otros métodos de estabilización

a. Estabilización por medios eléctricos

La más conocida es la electroósmosis, que es la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico a una muestra de suelo fino con exceso de humedad. Esto produce que el agua se traslade desde el ánodo (electrodo positivo) hasta el cátodo (electrodo negativo). El caudal que fluye a través de la muestra de suelo en las condiciones antes expuestas es proporcional al potencial eléctrico exterior que haya sido aplicado. Con este método, se ha observado un aumento de resistencia al corte y a la compresión simple de los suelos finos (arcillosos).

b. Estabilización de suelos con cal y polímeros

Valle (2010) señala que las fibras usualmente se utilizan para mejorar la resistencia del suelo y reducir la retracción. Se destaca como un método novedoso al mezclar fibras de polipropileno con cal, reduciendo así la cantidad de cal necesaria. Menciona también que las fibras incrementan la resistencia al corte del terreno natural sin tratamiento previo, por lo que la combinación cal y fibras permitirá la reducción de cal necesaria para estabilizar el terreno.

Los materiales utilizados para la estabilización según la tesis planteada son la cal y las fibras fibriladas de polipropileno. Con la dosificación de fibras, los niveles de cal se podrían reducir al 4%, así limitar la formación de etringita en los suelos con presencia de sulfatos.

Little (citado por Valle 2010) menciona que la etringita se produce cuando existe presencia de los sulfatos y la alúmina. El principal problema de esta patología es la expansión volumétrica hasta en un 250% en presencia de agua.

En la investigación de Valle, se obtiene aumento de la capacidad portante hasta en un 400% con una dosificación del 8% de cal y 0.15% de fibras. Los resultados de los ensayos de límites de Atterberg muestran cómo el suelo del terreno cambia de plástico a no plástico, con valores próximos a cero. El autor aclara que la reducción del índice de plasticidad no depende de las fibras, sino solo de la cal.

2.3.4. PROCTOR MODIFICADO

Este ensayo abarca los procedimientos de compactación usados en laboratorio, para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 o 6 pulgadas (de 101,6 a 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 10 lbf (44,5 N) que cae de una altura de 18 pulgadas (457 mm), produciendo una energía de compactación de 56.000 lb-pie/pie³ (2.700 kN-m/m³) (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016).

Este ensayo se aplica solo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 3/4 pulg (19,0 mm).

Aparatos

Ensamblaje del molde. Los moldes deben ser cilíndricos hechos de materiales rígidos. Las paredes del molde deberán ser sólidas, partidas o ahusadas. El tipo “partido” deberá tener dos medias secciones circulares, o una sección de tubo dividido a lo largo de un elemento que se pueda cerrar en forma segura formando un cilindro que reúna los requisitos de esta sección.

- El collar de extensión debe de alinearse con el interior del molde, la parte inferior del plato base y del área central ahuecada que acepta el molde cilíndrico debe ser plana.
- Molde de 4 pulgadas. Un molde que tenga en promedio $4,000 \pm 0,016$ pulg ($101,6 \pm 0,4$ mm) de diámetro interior, una altura de $4,584 \pm 0,018$ pulg ($116,4 \pm 0,5$ mm) y un volumen de $0,0333 \pm 0,0005$ pie³ (944 ± 14 cm³). Un molde con las características mínimas requeridas es mostrado en la figura.

Ilustración 4.
Equipo para ensayo de proctor modificado.



- Molde de 6 pulgadas. Un molde que tenga en promedio $6,000 \pm 0,026$ pulg ($152,4 \pm 0,7$ mm) de diámetro interior, una altura de $4,584 \pm 0,018$ pulg ($116,4 \pm 0,5$ mm) y un volumen de $0,075 \pm 0,0009$ pie³ ($2\ 124 \pm 25$ cm³). Un molde con las características mínimas requeridas es mostrado en la figura 2.

- Pisón o martillo. Un pisón operado manualmente o mecánicamente. El pisón debe caer libremente a una distancia de $18 \pm 0,05$ pulg ($457,2 \pm 1,6$ mm) de la superficie de espécimen.
- Extractor de muestras (opcional). Puede ser una gata, estructura u otro mecanismo adaptado con el propósito de extraer los especímenes compactados del molde.
- Balanza. Una balanza de aproximación de 1 gramo.
- Horno de secado. Con control termostático, preferiblemente de tipo de ventilación forzada, capaz de mantener una temperatura uniforme de 230 ± 9 °F (110 ± 5 °C) a través de la cámara de secado.
- Regla. Una regla metálica, rígida de una longitud conveniente, pero no menor que 10 pulgadas (254 mm). La longitud total de la regla recta debe ajustarse directamente a una tolerancia de $\pm 0,005$ pulg ($\pm 0,1$ mm). El borde de arrastre debe ser biselado si es más grueso que 1/8 pulg (3 mm).
- Tamices o mallas. De $\frac{3}{4}$ pulg (19,0 mm), $\frac{3}{8}$ pulg (9,5 mm) y malla 4 (4,75 mm), según los requisitos de las especificaciones ASTM E11 (especificación para mallas metálicas con fines de ensayo).
- Herramientas de mezcla. Diversas herramientas, como cucharas, mezclador, paleta, espátula, botella de spray, etcétera, o un aparato mecánico apropiado para la mezcla completo de muestra de suelo con incrementos de agua.

Método A

- Molde. 4 pulg de diámetro (101,6 mm).
- Material. Se emplea el que pasa por el tamiz 4 (4,75 mm).
- Capas. 5
- golpes por capa. 25
- Uso. Cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en el tamiz 4 (4,75 mm).
- Otros usos. Si el método no es especificado, los materiales que cumplen estos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando método B o C.

Método B

- Molde. 4 pulg (101,6 mm) de diámetro.
- Materiales. Se emplea el que pasa por el tamiz de 3/8 pulg (9,5 mm).
- Capas. 5
- Golpes por capa. 25
- Usos. Cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz 4 (4,75mm) y 20% o menos de peso del material es retenido en el tamiz 3/8 pulg (9,5 mm).
- Otros usos: Si el método no es especificado y los materiales entran en los requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando método C.

Método C

- Molde. 6 pulg (152,4mm) de diámetro.
- Materiales. Se emplea el que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ pulg (19,0 mm).
- Capas. 5
- Golpes por capa. 56
- Usos. Cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 3/8 pulg (9,53 mm) y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ pulg (19,0 mm).
- El molde de 6 pulgadas (152,4 mm) de diámetro no será usado con los métodos A o B.

Nota 4: Los resultados tienden a variar ligeramente cuando el material es ensayado con el mismo esfuerzo de compactación en moldes de diferentes tamaños.

- Si el espécimen de prueba contiene más de 5% en peso de fracción extra dimensionada (fracción gruesa) y el material no será incluido en la prueba se deben hacer correcciones al peso unitario y contenido de agua del espécimen de ensayo o la densidad de campo usando el método de ensayo ASTM D-4718.

- Este método de prueba, generalmente, producirá un peso unitario seco máximo bien definido para suelos que no drenan libremente. Si el método es usado para suelos que drenan libremente, el máximo peso unitario seco no estará bien definida y puede ser menor que la obtenida usando el método de prueba ASTM D-4253 (Maximum Index Density and Unit Weight of Soil Using a Vibratory Table).

Definiciones

Un suelo con un contenido de humedad determinado es colocado en cinco capas dentro de un molde de ciertas dimensiones. Cada una de las capas es compactada en 25 o 56 golpes con un pisón de 10 lbf (44.5 N) desde una altura de caída de 18 pulgadas (457 mm), sometiendo al suelo a un esfuerzo de compactación total de aproximadamente de 56,000 pie-lbf/pie³ (2 700 kN-m/m³). Se determina el peso unitario seco resultante.

El procedimiento se repite con un número suficiente de contenidos de agua para establecer una relación entre el peso unitario seco y el contenido de agua del suelo. Estos datos, cuando son ploteados, representan una relación curvilínea conocida como 'curva de compactación'. Los valores de óptimo contenido de agua y máximo peso unitario seco modificado son determinados de la curva de compactación.

Importancia y uso

El suelo utilizado como relleno en ingeniería (terraplenes, rellenos de cimentación, bases para caminos) se compacta a un estado denso para obtener propiedades satisfactorias de ingeniería, como: resistencia al esfuerzo de corte, compresibilidad o permeabilidad.

También los suelos de cimentaciones son a menudo compactados para mejorar sus propiedades de ingeniería. Los ensayos de compactación en laboratorio proporcionan las bases para determinar el porcentaje de compactación y contenido de agua que se necesitan para obtener las propiedades de ingeniería requeridas y para el control de la construcción para asegurar la obtención de la compactación requerida y los contenidos de agua.

Durante el diseño de los rellenos de ingeniería, se utilizan los ensayos de corte consolidación permeabilidad u otros ensayos que requieren la preparación de especímenes de ensayo compactado a algún contenido de agua para algún peso unitario.

Es práctica común, primero, determinar el óptimo contenido de humedad (W_o) y el peso unitario seco (máx) mediante un ensayo de compactación. Los especímenes de compactación a un contenido de agua seleccionado (w), sea del lado húmedo o seco del óptimo (W_o) o al óptimo (W_o) y a un peso unitario seco seleccionado relativo a un porcentaje del peso unitario seco máximo (máx).

La selección del contenido de agua (w), sea del lado húmedo o seco del óptimo (W_o) o al óptimo (W_o), y el peso unitario seco (máx) se deben basar en experiencias pasadas o se deberán investigar valores para determinar el porcentaje necesario de compactación.

Muestras

La muestra requerida para el método A y B es aproximadamente 35 lbm (16 kg) y para el método C es aproximadamente 65 lbm (29 kg) de suelo seco. Debido a esto, la muestra de campo debe tener un peso húmedo de al menos 50 lbm (23 kg) y 100 lbm (45 kg), respectivamente.

Determinar el porcentaje de material retenido en la malla 4 (4,75mm), 3/8 pulg (9,5 mm) o 3/4 pulg (19.0 mm) para escoger el método A, B o C. Realizar esta determinación separando una porción representativa de la muestra total y establecer los porcentajes que pasan las mallas de interés mediante el método de análisis por tamizado de agregado grueso y fino (MTC E 204). Solo es necesario para calcular los porcentajes para un tamiz o tamices de las cuales la información es deseada.

Preparación de aparatos

Seleccionar el molde de compactación apropiado según el método (A, B o C) a ser usado. Determinar y anotar su masa con aproximación al gramo. Ensamblar el molde, base y collar de extensión. Chequear el alineamiento de la pared interior del molde y collar de extensión del molde. Ajustar si es necesario. Chequear que el

ensamblado del pisón este en buenas condiciones de trabajo y que sus partes no estén flojas o gastadas. Realizar cualquier ajuste o reparación necesaria. Si los ajustes o reparaciones son hechos, el martillo deberá volver a ser calibrado.

Procedimiento del ensayo suelos

- No vuelva a usar el suelo que ha sido compactado previamente en laboratorio.
- Utilice el método de preparación húmedo método de preparación húmeda (preferido). Sin secado previo de la muestra, pásela a través del tamiz 4 (4,75 mm), 3/8 pulg (9,5 mm) o 3/4 pulg (19,0 mm), dependiendo del método a ser usado (A, B o C). Determine el contenido de agua del suelo procesado.
- Prepare mínimo cuatro (preferiblemente cinco) especímenes con contenidos de agua de modo que estos tengan un contenido de agua lo más cercano al óptimo estimado. Un espécimen que tiene un contenido de humedad cercano al óptimo deberá ser preparado, primero, por adiciones de agua y mezcla. Seleccionar los contenidos de agua para el resto de los especímenes de tal forma que resulten, por lo menos, dos especímenes húmedos y dos secos según el contenido óptimo de agua, que varíen alrededor de 2%. Como mínimo, son necesarios dos contenidos de agua en el lado seco y húmedo del óptimo para definir exactamente la curva de compactación. Algunos suelos con muy alto óptimo contenido de agua o una curva de compactación relativamente plana requieren grandes incrementos de contenido de agua para obtener un peso unitario seco máximo bien definido. Los incrementos de contenido de agua no deberán excederán de 4%.
- Usar aproximadamente 5 lbm (2,3 kg) del suelo tamizado en cada espécimen que se compacta empleando el métodos A o B; o 13 lbm (5,9 kg) cuando se emplee el método C.
- Método de preparación seca. Si la muestra está demasiado húmeda, reducir el contenido de agua por secado al aire hasta que el material sea friable. El secado puede ser al aire o por el uso de un aparato de secado, de manera que la temperatura de la muestra no exceda de 140 °F (60 °C). Disgregar por completo los grumos para evitar moler las partículas individuales. Pasar el material por el tamiz apropiado: 4 (4,75 mm), 3/8 pulg (9,5 mm) o 3/4 pulg (19,0 mm). Durante la preparación del material granular que pasa la malla 3/4 pulg

para la compactación en el molde de 6 pulg, disgregar o separar los agregados lo suficientemente para que pasen el tamiz 3/8 pulg de manera de facilitar la distribución de agua a través del suelo en el mezclado posterior.

- Preparar mínimo cuatro (preferiblemente cinco) especímenes.
- Usar aproximadamente 5 lbm (2,3 kg) del suelo tamizado para cada espécimen a ser compactado cuando se emplee el método A, B o 13 libras (5,9 kg) cuando se emplee el método C. Añadir las cantidades requeridas de agua para que los contenidos de agua de los especímenes tengan los valores descritos antes. Seguir la preparación del espécimen para los suelos secos o adición del agua en el suelo y el curado de cada espécimen de prueba. Compactación.

Tras el curado si se requiere, cada espécimen se compactará así:

- Determinar y anotar la masa del molde o molde y el plato de base.
- Ensamble y asegure el molde y el collar al plato base. El método de enlace o unión al cimiento rígido debe permitir un desmolde fácil del molde ensamblado, el collar y el plato base después que se concluya la compactación.
- Compactar el espécimen en cinco capas. Tras la compactación, cada capa deberá tener aproximadamente el mismo espesor. Antes de la compactación, hay que colocar el suelo suelto en el molde y extenderlo en una capa de espesor uniforme. Suavemente hay que apisonar el suelo antes de la compactación hasta que no esté en estado suelto o esponjoso, usando el pisón manual de compactación o un cilindro de 2 pulg (5 mm) de diámetro. Posteriormente a la compactación de cada una de las cuatro primeras capas, cualquier suelo adyacente a las paredes del molde que no han sido compactados o extendido cerca de la superficie compactada será recortado. El suelo recortado puede ser incluido con el suelo adicional para la próxima capa. Un cuchillo u otro aparato disponible pueden ser usados. La cantidad total de suelo usado será tal que la quinta capa compactada se extenderá ligeramente dentro del collar, pero no excederá ¼ pulg (6 mm) de la parte superior del molde. Si la quinta capa se extiende en más de ¼ pulg (6 mm) de la parte superior del molde, el espécimen será descartado. El espécimen

será descartado cuando el último golpe del pisón para la quinta capa resulta por debajo de la parte superior del molde de compactación. Compactar cada capa con 25 golpes para el molde de 4 pulgadas (101,6 mm) o 56 golpes para el molde de 6 pulgadas (152,4 mm).

- Al operar el pisón manual del pisón, se debe tener cuidado de evitar la elevación de la guía mientras el pisón sube. Mantener la guía firmemente y dentro de 5° de la vertical. Aplicar los golpes en una relación uniforme de aproximadamente 25 golpes por minuto y de manera que proporcione una cobertura completa y uniforme de la superficie del espécimen.
- Tras la compactación de la última capa, remover el collar y plato base del molde. El cuchillo debe usarse para ajustar o arreglar el suelo adyacente al collar, soltando el suelo del collar y removiendo sin permitir el desgarro del suelo bajo la parte superior del molde.
- Cuidadosamente, enrasar el espécimen compactado por medio de una regla recta a través de la parte superior e inferior del molde para formar una superficie plana en la parte superior e inferior del molde. Rellenar cualquier hoyo de la superficie con suelo no usado o despejado del espécimen, presionar con los dedos y vuelva a raspar con la regla recta a través de la parte superior e inferior del molde.
- Determine y registre la masa del espécimen y molde con aproximación al gramo. Cuando se deja unido el plato base al molde, determine y anote la masa del espécimen, molde y plato de base con aproximación al gramo.
- Remueva el material del molde. Obtener un espécimen para determinar el contenido de agua utilizando todo el espécimen (se refiere este método) o una porción representativa. Cuando se utiliza todo el espécimen, quíbrelo para facilitar el secado. De otra manera, se puede obtener una porción cortando axialmente por el centro del espécimen compactado y removiendo 500 gramos del material de los lados cortados. Obtener el contenido de humedad.
- Tras la compactación del último espécimen, comparar los pesos unitarios húmedos para asegurar que el patrón deseado de obtención de datos en cada lado del óptimo contenido de humedad sea alcanzado en la curva de compactación. Para cada peso unitario seco, hay que plotear el peso unitario húmedo y contenido de agua de cada espécimen compactado puede ser una

ayuda para realizar esta evaluación. Si el patrón deseado no es obtenido, serán necesarios compactar especímenes adicionales. Generalmente, un valor de contenido de agua mayor que el contenido de agua definido por el máximo peso unitario húmedo es suficiente para asegurar los datos del lado más húmedo que el óptimo contenido de agua para el máximo peso unitario seco.

Cálculos

- Calcule el peso unitario seco y contenido de agua para cada espécimen compactado, plotee los valores y dibuje la curva de compactación como una curva suave a través de los puntos (ver la ilustración 3). Plotee el peso unitario seco con aproximación 0,1 lbf /pie³ (0,2 kN/m³) y contenido de agua aproximado a 0,1%. A base de la curva de compactación, determine el óptimo contenido de agua y el peso unitario seco máximo. Si e smás de 5% en peso del material sobredimensionado (tamaño mayor) fue removido de la muestra, calcular el máximo peso específico y óptimo contenido de humedad corregido del material total usando la norma ASTM D4718 (método de ensayo para la corrección del peso unitario y contenido de agua en suelos que contienen partículas sobredimensionadas). Esta corrección debe realizarse en el espécimen de ensayo de densidad de campo más que al espécimen de ensayo de laboratorio.
- Plotear la curva de saturación al 100%. Los valores de contenido de agua para la condición de 100% de saturación pueden ser calculadas con el uso de la fórmula (4) (ver la ilustración 3).
- Contenido de agua, w • peso unitario seco. Calcular la densidad húmeda (ecuación 1), la densidad seca (ecuación 2) y luego el peso unitario seco (ecuación 3) como sigue:

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{1000 \times V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad húmeda del espécimen compactado (Mg/m³).

M_t = Masa del espécimen húmedo y molde (kg).

M_{md} = Masa del molde de compactación (kg).

V = Volumen del molde de compactación (m³).

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{W}{100}}$$

Donde:

ρ_d = Densidad seca del espécimen compactado (Mg/m³).

W = contenido de agua (%).

$$\gamma_d = 62,43 \text{ pd en lbf/ft}^3$$

$$\gamma_d = 9,807 \text{ pd en kN/m}^3$$

Donde:

γ_d = peso unitario seco del espécimen compactado.

En el cálculo de los puntos para el ploteo de la curva de 100% de saturación o curva de relación de vacíos cero del peso unitario seco, seleccione los valores correspondientes de contenido de agua a la condición de 100% de saturación como sigue:

$$W_{Sat} = \frac{(\gamma_w)(G_S) - \gamma_d}{(\gamma_d)(G_S)} \times 100$$

Donde:

W_{Sat} = Contenido de agua para una saturación completa (%).

γ_w = Peso unitario del agua 62,43 lbf/ pie³ o (9,807kN/m³).

γ_d = Peso unitario seco del suelo.

G_S = Gravedad específica del suelo.

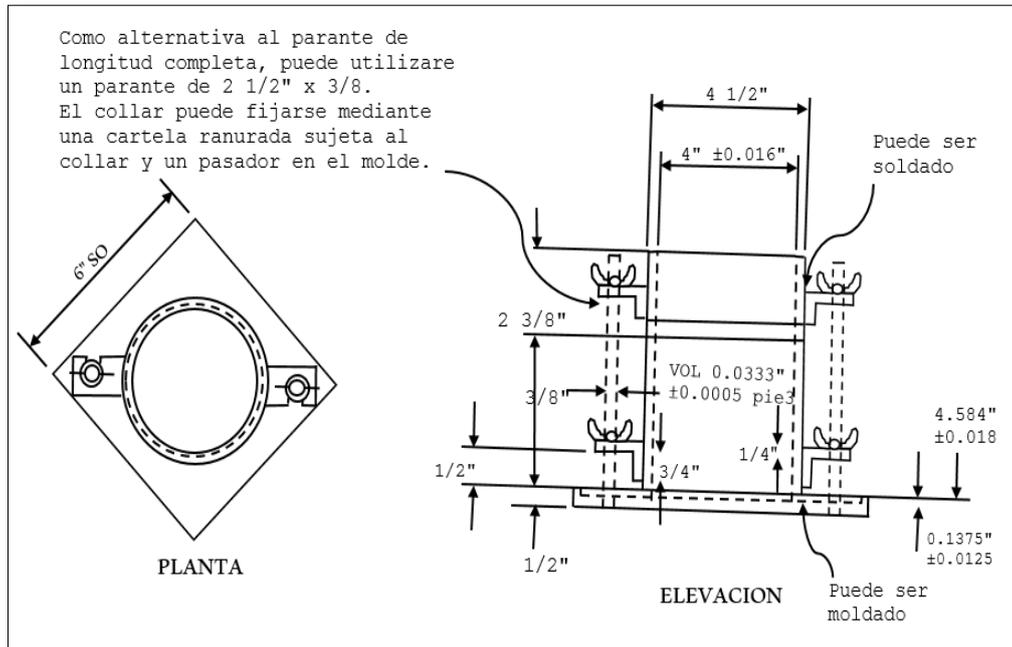
Tabla 11.
Tiempos establecidos y requeridos para humedecimiento de especímenes.

Clasificación	Tiempo de permanencia mínimo en horas
GW, GP, SW, SP	No se requiere
GM, SM	3
Todos los demás suelos	16

Terminología

- Definiciones. Ver terminología ASTM D-653 para definiciones generales.
- Descripción de términos específicos a esta norma:
- Esfuerzo modificado. Es el término aplicado para el esfuerzo de compactación de 56,000 lb pie/pie³ (2,700 kN-m/m³) aplicado por el equipo y procedimientos de este ensayo.
- Máximo peso unitario seco modificado, máximo (lbf/pie³ o kN/m³), el máximo valor definido por la curva de compactación del ensayo usando el esfuerzo modificado.
- Óptimo contenido de humedad modificado, W_o (%). Es el contenido de agua al que el suelo puede ser compactado, al máximo peso unitario seco usando el esfuerzo de compactación modificada.
- Fracción de tamaño mayor (fracción gruesa), P_c (%). Es la porción de la muestra total que no se utiliza en la ejecución del ensayo de compactación. Esta puede ser la parte de la muestra total retenida en la malla 4 (3,74 mm), 3/8 pulg (9,5 mm) o 3/4 pulg (19,0 mm).
- Fracción ensayada o de prueba (fracción fina), P_F (%). La parte de la muestra total usada en la ejecución de la prueba de compactación. Esta puede ser la fracción pasante la malla 4 (4,75 mm) en el método A, menor a la malla 3/8 pulg (9,5 mm) en el método B, o menor que la malla 3/4 pulg (19,0 mm) en el método C.

**Ilustración 5.
Molde de proctor.**



2.3.5. VALOR DE SOPORTE DE CALIFORNIA

Objetivo

- Describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido como CBR (California Bearing Ratio). El ensayo se realiza normalmente sobre suelo preparado en el laboratorio en condiciones determinadas de humedad y densidad, pero también puede operarse en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno.
- Este índice se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base, subbase y afirmado.

Aparatos

- Prensa similar a las usadas en ensayos de compresión utilizada para forzar la penetración de un pistón en el espécimen. El desplazamiento entre la base y el cabezal se debe regular a una velocidad uniforme de 1,27 mm (0.05") por minuto. La capacidad de la prensa y su sistema para la medida de carga debe

ser de 44.5 kN (10,000 lbf) o más y la precisión mínima en la medida debe ser de 44 N (10 lbf) o menos.

- Molde de metal cilíndrico de 152,4 mm \pm 0.66 mm (6 \pm 0.026") de diámetro interior y de 177,8 mm \pm 0.46 mm (7 \pm 0.018") de altura, provisto de un collar de metal suplementario de 50.8 mm (2.0") de altura y una placa de base perforada de 9.53 mm (3/8") de espesor. Las perforaciones de la base no excederán de 1,6 mm (28 1/16"), las que deberán estar uniformemente espaciadas en la circunferencia interior del molde de diámetro (figura 1a). La base se deberá poder ajustar a cualquier extremo del molde.
- Disco espaciador de metal circular de 150.8 mm (5 15/16") de diámetro exterior y de 61,37 \pm 0,127 mm (2,416 \pm 0,005") de espesor (figura 1b), 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 (equipo modificado).
- Aparato medidor de expansión compuesto por:
 - Una placa de metal perforada, por cada molde, de 149.2 mm (5 7/8") de diámetro, cuyas perforaciones no excedan de 1,6 mm (1/16") 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 este y medir la expansión, con aproximación de 0.025 mm (0.001").
- Pesas. Uno o dos pesas anulares de metal que tengan una masa total de 4,54 \pm 0,02 kg y pesas ranuradas de metal cada una con masas de 2,27 \pm 0,02 kg. Las pesas anular y ranurada deberán tener de 5 7/8" a 5 15/16" (de 149,23 mm a 150,81 mm) en diámetro. Además de tener la pesa anular un agujero central de 2 1/8" aproximado (53,98 mm) de diámetro.

Ilustración 6.
Molde y trípode de CBR.



- Pistón de penetración metálico de sección transversal circular de $49.63 \pm 0,13$ mm ($1,954 \pm 0,005$ ") de diámetro, área de 19.35 cm² (3 pulgadas²) y con longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración con las sobrecargas precisas según el numeral 3.4, pero nunca menor de 101.6 mm (4").
- Dos diales con recorrido mínimo de 25 mm (1") y divisiones lecturas en 0.025 mm (0.001"), uno de ellos provisto de una pieza que permita su acoplamiento en la prensa para medir la penetración del pistón en la muestra. • Una poza con capacidad suficiente para la inmersión de los moldes en agua. • 2.10 estufa, termostáticamente controlada, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$). • Balanzas, una de 20 kg de capacidad y otra de 1,000 gramos con sensibilidades de 1 g y 0.1 g, respectivamente. • Tamices de 4.76 mm (4), 19.05 mm (3/4") y 50,80 mm (2"). • Misceláneos de uso general como cuarteador, mezclador, cápsulas, probetas, espátulas, discos de papel de filtro del diámetro del molde, etcétera.

Procedimiento

El procedimiento es tal que los valores de la relación de soporte se obtienen a partir de especímenes de ensayo que posean el mismo peso unitario y contenido de agua que se espera encontrar en el terreno. En general, la condición de humedad crítica (más desfavorable) se tiene cuando el material está saturado. Por ello, el método original del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos considera el ensayo de los especímenes tras estar sumergidos en agua por un periodo de cuatro días confinados en el molde con una sobrecarga igual al peso del pavimento que actuará sobre el material.

Preparación de la muestra. Se procede como se indica en las normas mencionadas (relaciones de peso unitario-humedad en los suelos con equipo estándar o modificado). Cuando más del 75% en peso de la muestra pase por el tamiz de 19.1 mm (3/4"), se utiliza para el ensayo el material que pasa por este tamiz. Cuando la fracción de la muestra retenida en el tamiz de 19.1 mm (3/4") sea superior a un 25% en peso, se separa el material retenido en dicho tamiz y se sustituye por una proporción igual de material comprendido entre los tamices de 19.1 mm (3/4") y de 4.75 mm (4), obtenida tamizando otra porción de la muestra.

De la muestra así preparada se toma la cantidad necesaria para el ensayo de apisonado, más unos 5 kg por cada molde CBR.

- Se determina la humedad óptima y la densidad máxima por medio del ensayo de compactación elegido. Se compacta un número suficiente de especímenes con variación en su contenido de agua para establecer definitivamente la humedad óptima y el peso unitario máximo. Estos especímenes se preparan con diferentes energías de compactación. Normalmente se usan la energía del proctor estándar, la del proctor modificado y una energía inferior al proctor estándar. Así, se puede estudiar la variación de la relación de soporte con estos dos factores que son los que la afectan principalmente. Los resultados se grafican en un diagrama de contenido de agua contra peso unitario.
- 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, generalmente la

óptima determinada según el ensayo de compactación elegido y se mezcla íntimamente con la muestra.

Elaboración de especímenes. Se pesa el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador y, sobre este, un disco de papel de filtro grueso del mismo diámetro.

Una vez preparado el molde, se compacta el espécimen en su interior, aplicando un sistema dinámico de compactación (ensayos mencionados, ídem proctor estándar o modificado), pero utilizando en cada molde la proporción de agua y la energía (número de capas y de golpes en cada capa) necesarias para que el suelo quede con la humedad y densidad deseadas (véase figura 2a). Es frecuente utilizar tres o nueve moldes por cada muestra, según la clase de suelo granular o cohesivo con grados diferentes de compactación.

Para suelos granulares, la prueba se efectúa dando 55, 26 y 12 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 55, 26 y 12 golpes por capa con diferentes humedades, para obtener una familia de curvas que muestran la relación entre el peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.

Si el espécimen se sumergirá, se toma una porción de material, de 100 a 500 g (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 será sumergida, la porción de material para determinar la humedad se toma del centro de la probeta resultante de compactar el suelo en el molde, tras el 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 o cuchillo de hoja resistente y bien recta. Cualquier depresión producida al eliminar partículas gruesas durante el enrase, se rellenará con material sobrante sin gruesos, comprimiéndolo con la espátula.
- 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. Se coloca sobre la superficie de la muestra invertida la placa perforada con vástago, y, sobre esta, los anillos necesarios para completar una sobrecarga que produzca una presión equivalente a la originada por

todas las capas de materiales que hayan de ir encima del suelo que se ensaya, la aproximación quedará dentro de los 2,27 kg (5,5 lb) correspondientes a una pesa. En ningún caso, la sobrecarga total será menor de 4,54 kg (10 lb) (véase la ilustración 7-2b).

Nota 2: A falta de instrucciones concretas al respecto, se puede determinar el espesor de las capas que se han de construir por encima del suelo que se ensaya, bien por estimación o por algún método aproximado. Cada 15 centímetros (6") de espesor de estructura del pavimento corresponde aproximadamente a 4,54 kg (10 lb) de sobrecarga.

Se toma la primera lectura para medir el hinchamiento colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde, haciendo coincidir el vástago del dial con el de la placa perforada. Se anota su lectura, el día y la hora. 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) "con el nivel de agua aproximadamente constante". Es admisible también un periodo de inmersión más corto si se trata de suelos granulares que se saturan de agua rápidamente y si los ensayos muestran que esto no afecta los resultados (véase ilustración 7).

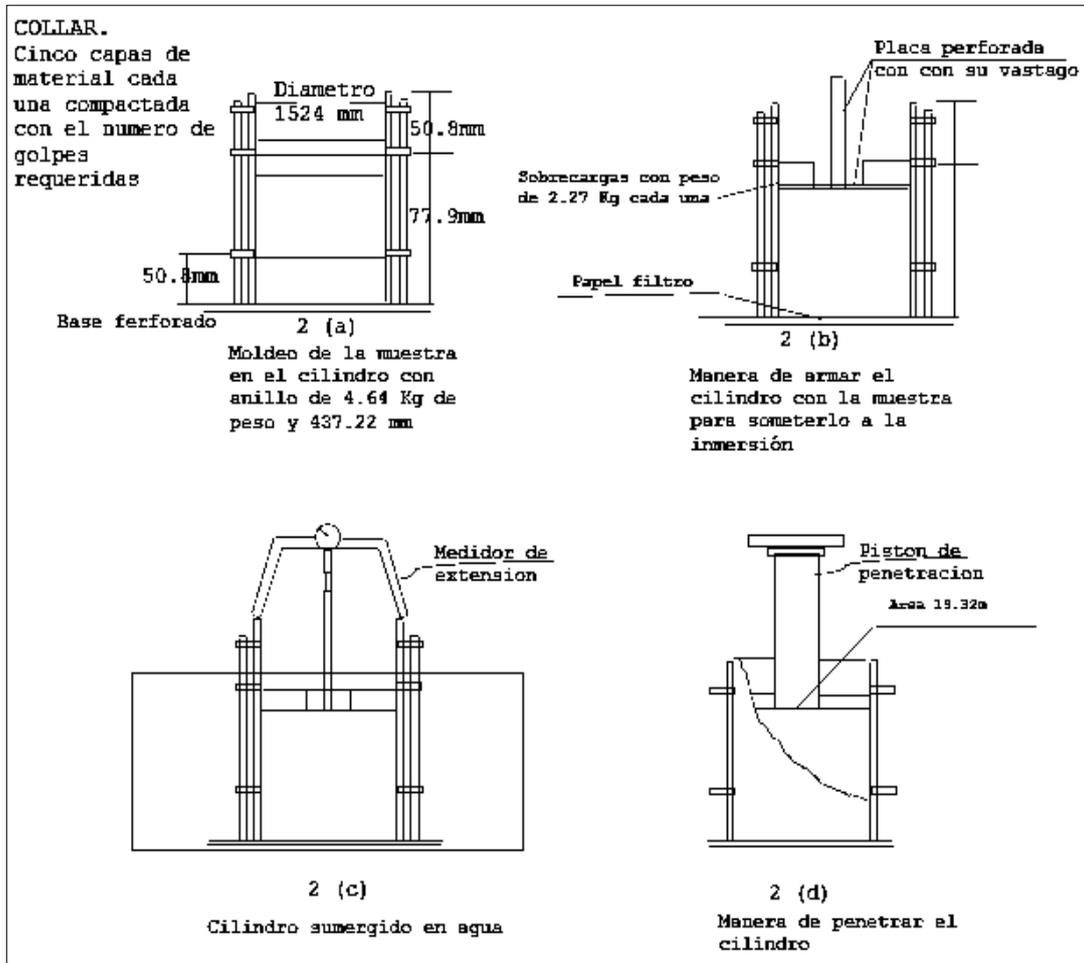
- Al final del periodo de inmersión, se vuelve a leer el deformímetro para medir el hinchamiento. Si es posible, se deja el trípode en su posición sin moverlo durante todo el periodo de inmersión. No obstante, si fuera preciso, tras la primera lectura, puede retirarse, marcando la posición de las patas en el borde del molde para repetirla en lecturas sucesivas. La expansión se calcula como un porcentaje de la altura del espécimen.
- Tras el 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 y se procede al ensayo de penetración según el proceso del numeral siguiente.
- Es importante que no transcurra más tiempo que el indispensable desde cuando se retira la sobrecarga hasta cuando vuelve a colocarse para el ensayo de penetración.

Penetración. Se aplica una sobrecarga que sea suficiente para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento (con ± 2.27 kg de aproximación), pero no menor de 4.54 kg (10 lb). Para evitar el empuje hacia arriba del suelo dentro del agujero de las pesas de sobrecarga, es conveniente asentar el pistón luego de poner la primera sobrecarga sobre la muestra.

Llévese el conjunto a la prensa y colóquese en el orificio central de la sobrecarga anular, el pistón de penetración y añade el resto de la sobrecarga si hubo inmersión, hasta completar la que se utilizó en ella. 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 (véase ilustración 7-2d). Para evitar que la lectura de penetración se vea afectada por la lectura del anillo de carga, el control de penetración deberá apoyarse entre el pistón y la muestra o molde.

Ilustración 7.
Determinación del valor de la reacción de soporte en el laboratorio.



Se aplica la carga sobre el pistón de penetración mediante el gato o mecanismo correspondiente de la prensa, con una velocidad de penetración uniforme de 1.27 mm (0.05”) por minuto. Las prensas manuales no preparadas para trabajar a esta velocidad de forma automática se controlarán mediante el deformímetro de penetración y un cronómetro. Se anotan las lecturas de la carga para las siguientes penetraciones.

Penetración

Milímetros	Pulgadas
0.63	0.02
1.27	0.05
1.90	0.07
2.54	0.10
3.17	0.12
5.08	0.20
7.62	0.30
10.16	0.40
12.70	0.50

Estas lecturas se hacen si se desea definir la forma de la curva, pero no son indispensables. Por último, 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.

Cálculos humedad de compactación. El tanto por ciento de agua que hay que añadir al suelo con su humedad natural para que alcance la humedad prefijada, se calcula como sigue:

$$\% \text{ de agua a añadir} = \frac{H - h}{100 + h} \times 100$$

Donde:

H = Humedad prefijada.

h = Humedad natural, densidad o peso unitario.

La densidad se calcula a partir del peso del suelo antes de sumergirlo y de su humedad, de la misma forma que en los métodos de ensayo citados. Proctor normal o modificado para obtener la densidad máxima y la humedad óptima.

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 tras esta (numerales 3.2 y 3.4). 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 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.

Presión de penetración. Se calcula la presión aplicada por el penetrómetro y se dibuja la curva para obtener las presiones reales de penetración a partir de los datos de prueba. El punto cero de la curva se ajusta para corregir las irregularidades de la superficie que afectan la forma inicial de la curva (véase ilustración 8).

Expansión. La expansión se calcula por la diferencia entre las lecturas del deformímetro antes y después de la inmersión, numeral 3.2. 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").

Es decir:

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

Siendo:

L1 = Lectura inicial en mm.

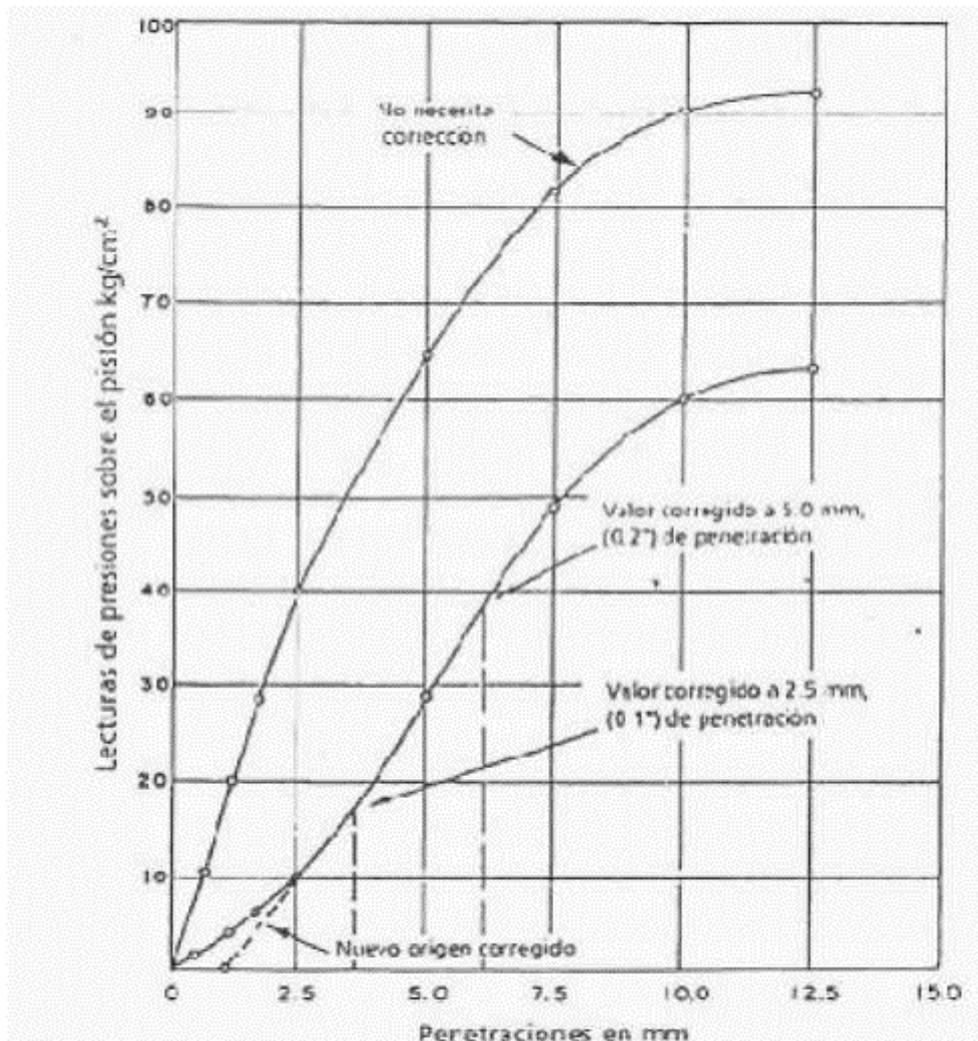
L2 = Lectura final en mm.

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 son las siguientes:

Tabla 12.
Índice de CBR.

Penetración		Presión		
Mm	Pulgadas	MN/m ²	kgf/cm ²	lb/plg ²
2,54	0,1	6,90	70,31	1,000
5,08	0,2	10,35	105,46	1,500

Ilustración 8.
Índice de CBR.

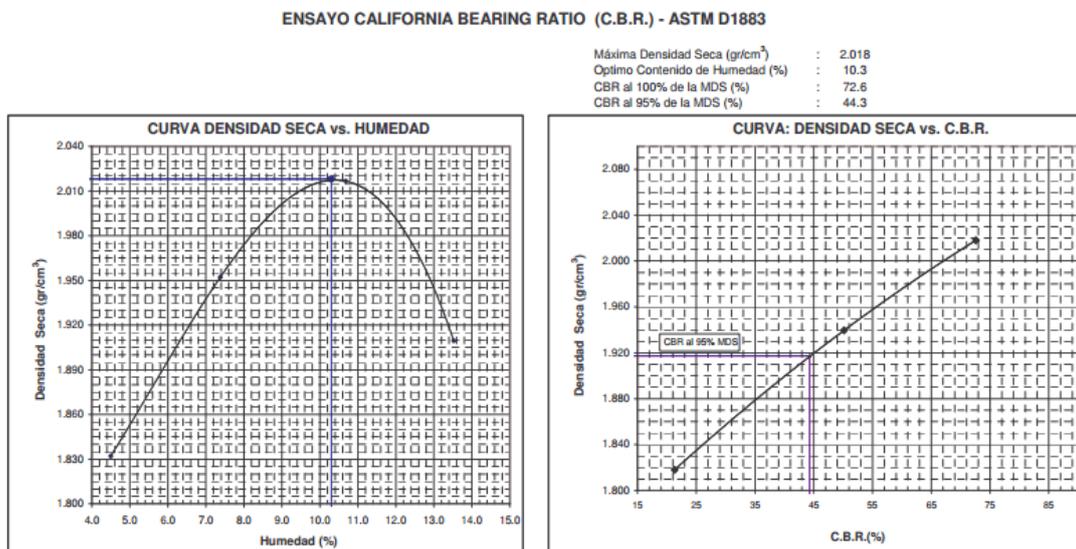


Para calcular el índice CBR se procede como sigue:

- Se dibuja una curva que relacione las presiones (ordenadas) y las penetraciones (abscisas) y se observa si esta curva presenta un punto de inflexión. Si no presenta punto de inflexión, se toman los valores correspondientes a 2,54 mm y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración. Si la curva presenta un punto de inflexión, la tangente en ese punto cortará el eje de abscisas en otro punto (o corregido), que se toma como nuevo origen para la determinación de las presiones correspondientes a 2,54 mm y 5,08 mm.
- De la curva corregida, tómnese los valores de esfuerzo-penetración para los valores de 2,54 mm y 5,08 mm, y calcúlense los valores de relación de soporte

correspondientes, dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia 6,9 MPa (1.000 lb/plg²) y 10,3 MPa (1.500 lb/plg²), respectivamente, y multiplíquese por 100. La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2,54 mm (0,1”) de penetración. Cuando la relación a 5,08 mm (0,2”) de penetración resulta ser mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, úsese la relación de soporte para 5,08 mm (0,2”) de penetración.

Ilustración 9.
Gráfica de esfuerzo-penetración de muestras de CBR. Ejemplo del manual de ensayos.



2.3.6. POLÍMEROS RECICLADOS

2.3.6.1. Botellas descartables de plástico

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, pues 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 y otros, 2013).

En el Perú, según la organización de Manos Productivas, Villa El Salvador, se produce como residuos aproximadamente 140 mil kilogramos de botellas de plástico por día. Esta cantidad representa más de 4 millones de botellas que se votan a escala nacional.

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 grupos, según los materiales por los cuales fueron elaborados. Para identificar esta clasificación, en la parte inferior de cada botella descartable se aprecia un número con algunas letras. Estas letras y números indican qué tipo de botella de plástico es y qué tipo de precauciones se debe tomar al usar ese tipo de botella en particular. Existen siete tipos de botellas según los componentes y según los usos que se le dan (recuperado: elblogverde.com).

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 “1” y las iniciales PET.

Imagen 1.
Frasco típico y símbolo de reciclaje PET.



b.2. HDPE (polietileno de alta densidad)

Las botellas HDPE son las únicas que tienen el número “2” impreso 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 botellas de champú, detergente, cloro, etcétera. Las botellas de HDPE (moldes) comenzaron a reemplazar a otros tipos de recipientes, como el vidrio y el metal en la década de 1970.

Imagen 2.
Frasco típico y símbolo de reciclaje HDPE.



b.3. V O PVC (vinílicos o cloruro de polivinilo)

Estas botellas tienen el número “3” impreso en la parte inferior. 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, etcétera.

Imagen 3.
Frasco típico y símbolo de reciclaje V.



b.4. LDPE (polietileno de baja densidad)

El tipo de botellas de plástico del número “4” son las botellas de LDPE hechas de polietileno de baja densidad. Este es un plástico delgado que por lo regular se usa como una barrera cerosa contra la humedad que puede fabricarse a un precio bajo. Se funde fácilmente, lo que lo hace ideal cuando es necesario usar el sellado por calor. Este plástico es fuerte, flexible y transparente.

Imagen 4.
Frasco típico y símbolo de reciclaje LDPE.



b.5. PP (polipropileno)

Presenta el número “5” en la parte inferior. Son las botellas PP hecha de polipropileno. El polipropileno tiene un punto de fusión muy elevado, razón por la cual se usa tradicionalmente para artículos que necesitan ser calentados o en los que es necesario verter líquidos calientes, como el café. También es bueno para tinas pequeñas que necesitan calentarse. Su alto punto de fusión permite envases capaces de contener líquidos y alimentos calientes.

Imagen 5.
Frasco típico y símbolo de reciclaje PP.



b.6. PS (poliestireno)

Es utilizado en platos y vasos de usar y tirar, hueveras, bandejas desechables utilizadas en alimentación, envases de aspirina, etcétera. Su bajo punto de fusión posibilita que pueda derretirse en contacto con el

calor. Una vez reciclado, se pueden obtener diversos productos, entre ellos material para edificación, aislantes, etcétera.

Imagen 6.
Frasco típico PS.



b.7. Otros

Si el número “7” está impreso en la botella, indica que está hecha de otro material diferente a los anteriores o hecha de una combinación de dos o más capas de otros plásticos. Por ejemplo, con estos plásticos están hechos algunos materiales a prueba de balas, DVD, gafas de sol, MP3 y PC, etcétera.

Imagen 7.
Símbolo de reciclaje “Other”.



2.3.6.2. El PET y el medioambiente

El consumo global del PET se calcula en 12 millones de toneladas con un crecimiento anual de 6%. “El problema ambiental del PET radica en que tan solo 20% del PET que se consume en el mundo se recicla, el resto se dispone en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto” (web El Ecologista).

Pese a que las características físicas y químicas aseguran que este material es inerte en el medio ambiente, el impacto visual que produce su inadecuada disposición es alto y perceptible para la población.

Para la fabricación de nuevas botellas descartables, solo se utiliza el 10% las hojuelas del PET reciclado y el resto es la materia prima PET obtenido del proceso del petróleo con el antimonio (web Espacio Sostenible).

El PET no es biodegradable. Nunca llega a ser asimilado por la naturaleza y solo es degradado por el agua y el sol.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y RECOLECCIÓN DE DATOS

3.1. MÉTODO GENERAL: MÉTODO CIENTÍFICO

El método específico es el experimental, porque la investigación se apoya en la observación de fenómenos provocados o manipulados en laboratorio (Ccanto, 2010) y es una situación de control en la que se manipulan de manera intencional, una o más variables independientes (causas) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efecto)¹¹

El diseño de investigación es el preexperimental y se define como el resultado pretest a los obtenidos de los ensayos de laboratorio del suelo de subbase de las muestras de estudio sin la adición de aditivos, y el posttest son las distintas dosificaciones en porcentajes del polímero reciclado.

Para mejorar la subbase de baja capacidad portante con un nuevo método como es la adición de polímeros reciclados, se seleccionaron muestras críticas según los ensayos básicos realizados en el laboratorio, para luego ser analizados y ver el comportamiento ante la adición en diferentes porcentajes de polímeros reciclados, para luego ser comparado con muestras sin aditivos.

¹¹ Cfr. Hernández y otros, 2010.

3.2. MÉTODO APLICADO

El método aplicado es el cuantitativo porque usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

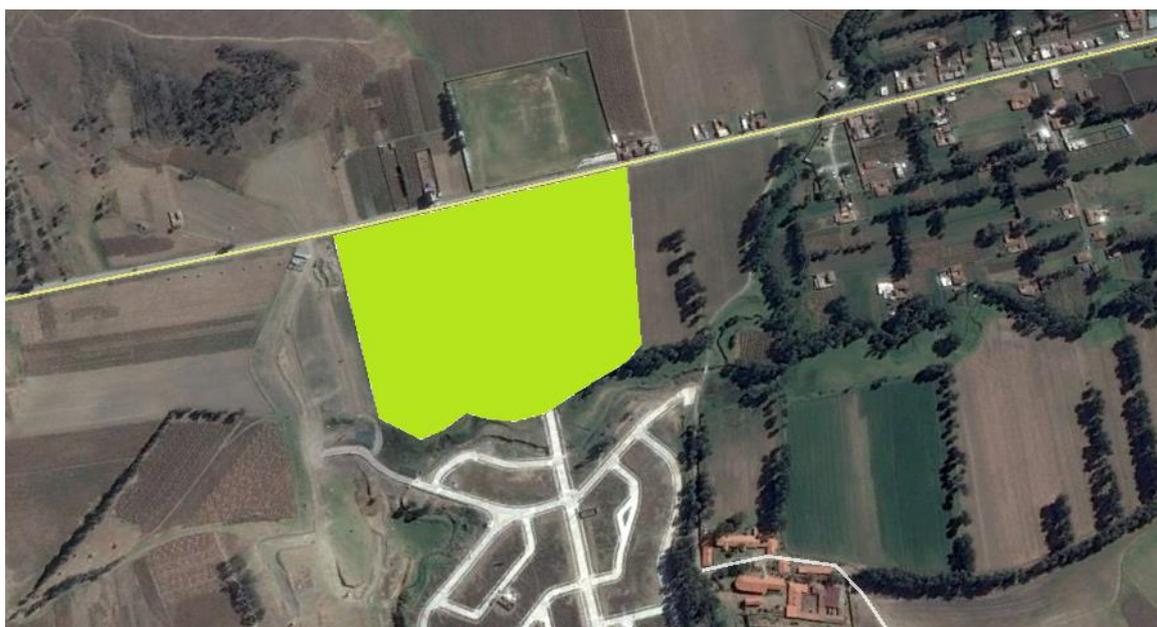
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. POBLACIÓN

La población son las subbases de pavimento rígido de la obra movimiento de tierras, pavimentación de pistas y veredas urbanización Los Eucaliptos de Huancayo, II etapa.

Ilustración 10.

Croquis de ubicación de la urbanización Los Eucaliptos.



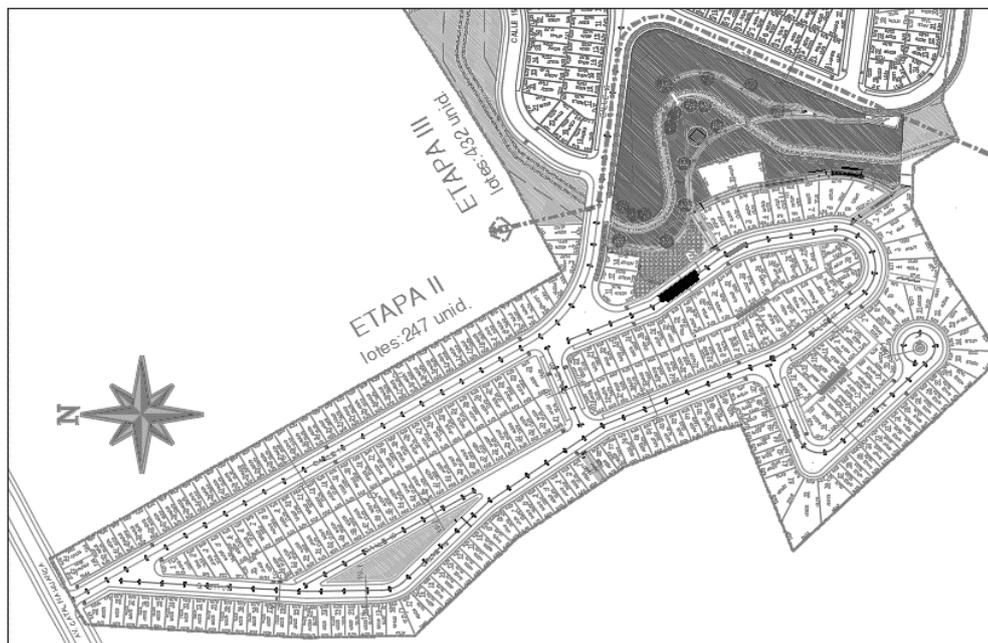
3.3.2. MUESTRA

La muestra que se analiza en esta investigación es obtenida de la obra “Movimiento de tierras y pavimentación de pista y veredas de la Urb. Los Eucaliptos de Huancayo-II etapa”. Ubicación: distrito de El Tambo, provincia de Huancayo, departamento de Junín.

La obra comprende la construcción de pistas y veredas de la urbanización Los Eucaliptos de Huancayo, segunda etapa.

Ilustración 11.

Plano de la distribución de manzanas de la urbanización Los Eucaliptos.



3.4. TÉCNICA E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Llamamos datos a los elementos básicos de la información primaria que se obtiene directamente de la realidad.

3.4.1. TÉCNICAS

Una vez identificada la cantera que se utilizará para extraer el material para la colocación de la capa de base para los pavimentos del acceso principal. Se determinó la cantidad de material para la elaboración de 73 CBR. Un aproximado de 3,600 kg.

El segundo paso fue el traslado de la muestra al laboratorio para los ensayos básicos y específicos que ayudarán para la elaboración de conclusiones y recomendaciones de la investigación.

3.4.2. INSTRUMENTOS

Los instrumentos que se utilizaron para la presente investigación fueron: equipos de laboratorio para el ensayo de la muestra, equipo de cómputo (para el proceso

de datos), información bibliográfica y manuales de laboratorio, equipos fotográficos, calculadoras y materiales de apunte.

3.5. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

a. Obtención de la muestra: La muestra se obtuvo del acopio de material en la cantera que se iba a utilizar en el proyecto para la conformación de la capa granular de pavimentos. Se recopiló un aproximado de 1,800 kg de muestra en cinco viajes.

b. Preparación de la muestra: La muestra de suelo se trasladó a las instalaciones del laboratorio de Dosed Perú, donde se depositó la muestra y esparció para realizar los ensayos de contenido de humedad, granulometría, proctor y CBR.

c. Obtención de la fibra: La fibra PET se obtuvo de forma artesanal, primero se obtuvieron tres sacos de botellas, una parte se recolectó de la casa y vecinos y la mayor parte se compró a S/ 0.625 el kg. Es proceso que se siguió fue el siguiente:

- Compra.
- Corte de la base.
- Lavado.
- Corte para fibra.

El producto obtenido fue fibras de 1 mm a 2 mm de espesor y de diferentes longitudes de 2, 3, 4 y 5 centímetros.

d. Ensayo en la muestra patrón: Se realizaron los ensayos a la muestra patrón (sin aditivo) para caracterizar sus propiedades. Los ensayos fueron: contenido de humedad, granulometría, clasificación de suelos, proctor modificado y CBR. De aquí se puede saber parámetros como W, OCH, MDS, CBR (95% y 100%) que luego se tomaron como valores de referencia para elaborar tablas y cuadros.

e. Ensayo en la muestra + aditivo: Se realizaron los ensayos a la muestra con adiciones de porcentaje en peso de fibra. Los porcentajes elegidos fueron 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.25, 1.50% y 1.75% (mas porcentaje no es trabajable). Por cada porcentaje se realizaron tres CBR y se repitió en cada longitud de fibra 2, 3, 4 y 5 centímetros para calcular un promedio que represente mejor el efecto. En total, se realizaron 72 ensayos de CBR.

Para la presente investigación, se siguió la siguiente secuencia: la primera, como ya se dijo en el párrafo resumen, fue localizar y ubicar la muestra, luego se seleccionó y obtuvo la muestra para realizar los ensayos preliminares y específicos como el proctor y CBR.

Ilustración 12.

Plano de ubicación del proyecto urbanización Los Eucaliptos.

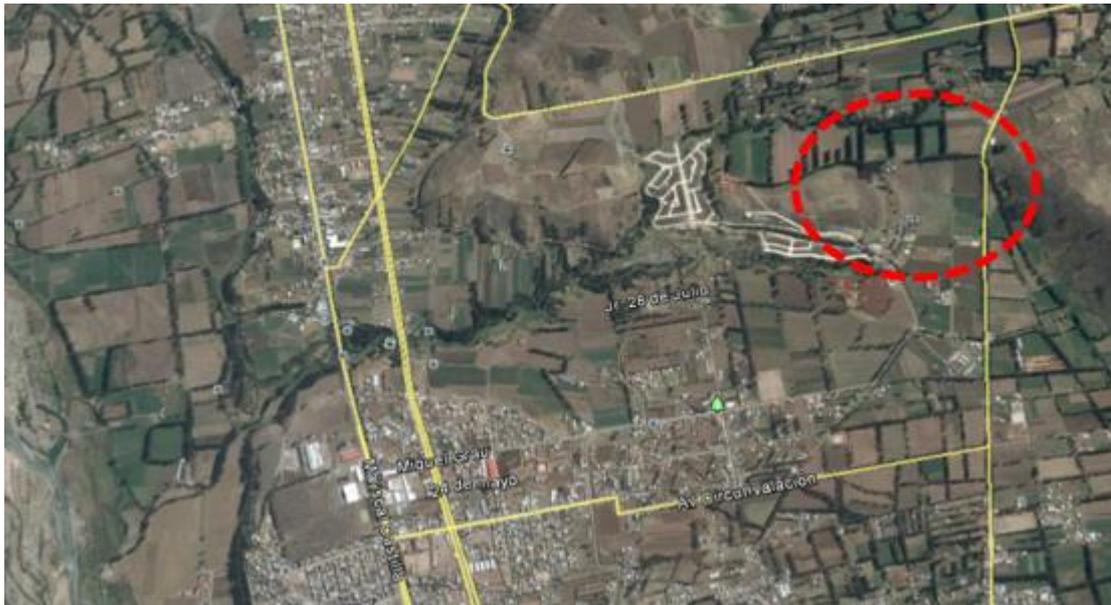
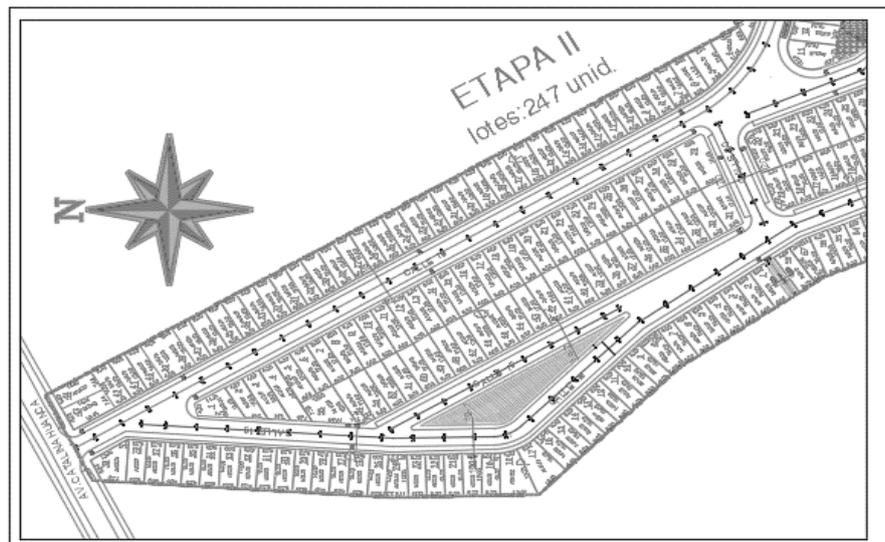


Ilustración 13.

Localización de la zona de muestra.



3.5.1. SELECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO DE CANTERA

El objetivo es obtener una muestra representativa mediante procedimientos normados por el MTC.

Referencias normativas:

“Manual de suelos, geología, geotecnia y pavimentos”, sección “Suelos y pavimentos MTC”.

Lineamientos generales para un programa de exploración y localización de fuentes de materiales pétreos.

- a. Naturaleza y tipo de los agregados o áridos requerido.
- b. Volumen o cantidades de cada tipo de material que será empleado en la construcción o conservación.
- c. Clases de rocas o suelos que responden a las características de los materiales necesarios y formas de ocurrencia en el área del proyecto.
- d. Disponibilidad de medios de explotación y procesamiento.

El interés del estudio de las fuentes de materiales de donde se extraerán agregados para diferentes usos principales como mejoramientos de suelos, terraplenes, afirmado, agregados para rellenos, subbase y base granular, agregados para tratamientos bituminosos, agregados para mezclas asfálticas y agregados para mezclas de concreto, es determinar si los agregados son aptos o no para el tipo de obra a emplear. En tal sentido, se requiere determinar sus características mediante la realización de los correspondientes ensayos de laboratorio.

Ubicación

Las fuentes de materiales o canteras serán ubicadas en función a su distancia de la obra a realizar (centro de gravedad), considerando para su selección la menor distancia a la obra, siempre que cumplan con la calidad y cantidad (potencia) requeridas por la obra. Para ello, se realizará un levantamiento topográfico del recorrido desde el inicio de la cantera a la obra, precisando kilometraje, longitud y tipo de acceso. Asimismo, se delimitará topográficamente los linderos de las fuentes de materiales o canteras.

Muestreo

Para muestreo de los estratos, el consultor se ceñirá al manual de ensayo de materiales del MTC vigente, norma MTC E 101. En lo no especificado en el manual de ensayo de materiales, se procederá según lo siguiente:

Se realizará mínimo cinco exploraciones por cada área menor o igual a una hectárea. La ubicación de los puntos de prospección será a distancias aproximadamente iguales, para luego densificar la exploración si se estima pertinente. Las exploraciones consistirán en calicatas, sondeos y/o trincheras a profundidades no menores de la profundidad máxima de explotación, para garantizar la real potencia de los bancos de materiales.

La cantidad de muestras extraídas de canteras deberá ser la que permita efectuar los ensayos exigidos, así como también ensayos de verificación para rectificar y/o ratificar resultados poco frecuentes.

Las muestras representativas de los materiales de cada cantera serán sometidas a los ensayos estándar, para determinar sus características y aptitudes para los diversos usos que sean necesarios (rellenos, afirmado, subbase, base, tratamientos superficiales, carpetas asfálticas, obras de concreto hidráulico, etcétera).

3.5.2. ENSAYOS PARA EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.5.2.1. Ensayos preliminares de laboratorio

a. Contenido de humedad

Referencias normativas:

MTC E 108, Determinación del contenido de humedad de un suelo

La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como porcentaje del peso de agua en una masa dada de suelo al peso de las partículas sólidas.

Este modo operativo determina el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a 110 ± 5 °C*. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al

secado es considerado como el peso del agua (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016).

Nota 1 (*). El secado en horno siguiendo el método (a 110 °C) no da resultados confiables cuando el suelo contiene yeso u otros minerales que contienen gran cantidad de agua de hidratación o cuando el suelo contiene cantidades significativas de material orgánico. Se pueden obtener valores confiables del contenido de humedad para los suelos, secándose en un horno a una temperatura de 60 °C o en un desecador a temperatura ambiente.

Se calcula el contenido de humedad de la muestra mediante la siguiente fórmula:

$$w = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

$$W = \frac{M_{CWS} - M_{CS}}{M_{CS} - M_C} \times 100 = \frac{M_W}{M_S} \times 100$$

Donde:

W = es el contenido de humedad (%).

M_CWS = es el peso del contenedor más el suelo húmedo en gramos.

M_CS = es el peso del contenedor más el suelo secado en horno en gramos.

M_C = es el peso del contenedor en gramos.

M_W = es el peso del agua en gramos.

M_S = es el peso de las partículas sólidas en gramos.

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

b. Análisis granulométrico por tamizado

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016). Este modo operativo describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo hasta el de 74 mm (200).

Referencias normativas:

MTC E 107, Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

Equipos y accesorios:

Tamices de malla cuadrada.

Dos balanzas una con sensibilidad de 0,01 g para pesar material que pase el tamiz de 4,760 mm (4). Otra con sensibilidad de 0,1% del peso de la muestra para pesar los materiales retenidos en el tamiz de 4,760 mm (4).

Estufa.

Bandejas, cepillos y brochas.

Muestra:

El suelo tiene que secar al aire libre.

Cuartear el suelo secado al aire libre hasta obtener una muestra representativa.

Procedimientos:

Pesar la muestra representativa (obtenido del cuarteo) y llevarla al horno por 24 horas.

Se realiza un lavado por la malla 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 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 y se aplica la siguiente ecuación:

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

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

Para ver gráficamente el comportamiento de las partículas de un suelo, se grafican en un formato semilogarítmico.

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 (malla 200).

c. Determinación de límite líquido, límite plástico e índice plástico

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016). Límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material 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 110: Determinación del límite líquido de los suelos.

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

Equipos y accesorios:

Recipientes para almacenaje y mezcla.

Tamiz 40.

Espátula de hoja flexible.

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

Cápsulas 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 30 centímetros. De lado, de forma cuadrada por 1 centímetro de espesor.

Muestra:

Para el límite líquido obtener una muestra seca de 150 a 200 gr. Pasante el tamiz 40 y 25 gr para el límite plástico.

Procedimientos:

Determinación del límite líquido.

Colocar el suelo pasante malla 40 en una vasija de evaporación y añadir una pequeña cantidad de agua. Dejar que la muestra se humedezca.

Mezclar con ayuda de la espátula hasta que el color sea uniforme y conseguir una mezcla homogénea.

Se coloca una pequeña cantidad de masa húmeda en la parte central de la copa y se nivela la superficie, luego se pasa el acanalador por el centro de la copa para cortar en dos la pasta de suelo.

Poner en movimiento la cazuela con ayuda de la manivela y suministrar los golpes a una velocidad de dos golpes por segundo que sean necesarios para cerrar la ranura en 12.7 mm cuando se cierre la ranura, registrar la cantidad de golpes y tomar una muestra de la parte central para la determinación del contenido de humedad.

Este proceso se repite nuevamente con tres muestras más para lograr cuatro puntos a diferentes contenidos de humedad.

Determinación de 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 20 gr.

Se amasa el suelo y se deja que pierda humedad hasta una consistencia a la que 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.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = índice de plasticidad.

LL = límite líquido.

LP = límite plástico.

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

3.5.2.2. Ensayo proctor

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016). 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 13.

Tabla 13.
Métodos de compactación (proctor modificado).

	Método A	Método B	Método C
Molde	4" de diámetro (101,6 mm)	4" de diámetro (101,6 mm)	6 " (152,4 mm) de diámetro
Material	Se emplea el que pasa por el tamiz 4	Se emplea el que pasa por el tamiz de 3/8"	Se emplea el que pasa por el tamiz 3/4"
Capas	5	5	5
Golpes	25	25	56
Uso	Cuando el 20% o menos del peso del material es retenido en el tamiz 4	Cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz 4 y 20% o 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 estos 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: Bañón y Beviá García, 2000.

Referencias normativas:

ASTM D-1557, Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics Of Soil Using Modified Effort (2700 KN-m/m³).

MTC E 115, Compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (proctor modificado).

Equipos y accesorios:

Molde de 4 o 6 pulgadas con una altura de 4,584 pulg (116,4 mm) y un volumen de 0,0333 pie³ (944 cm³) y 0,075 pie³ (2,124 cm³), 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 3/4" (19,0 mm), 3/8" (9,5 mm) y 4 (4,75 mm).

Diversas herramientas como cucharas, mezclador, pipeta, probetas, fuente para la mezcla completo de muestra de suelo con incrementos de agua.

Muestra:

Este ensayo se aplica solo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de 3/4" (19,0 mm).

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

Disgregar por completo los grumos para evitar moler las partículas individuales. Pasar el material por el tamiz 4, 3/8" o 3/4", según el método a emplearse.

Procedimientos:

Se prepara mínimo cuatro (preferiblemente, cinco) especímenes con contenidos de agua, de modo que estos tengan un contenido de agua lo más cercano al óptimo estimado.

Preparar cuatro o cinco muestras de 6 kg. 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 o 56 golpes, según el método de ensayo.

Compactar el espécimen en cinco capas. Cada una deberá tener aproximadamente el mismo espesor. Se aplicarán los golpes en una relación uniforme de aproximadamente 25 golpes por minuto.

La última capa debe quedar en el collarín, de manera que luego pueda enrasarse.

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 cuatro 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:

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

Donde:

γ_d = Densidad seca.

γ_m = Densidad húmeda.

ω = Contenido de humedad.

3.5.2.3. Ensayo CBR

(Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2016). 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.

AASHTO T-193.

MTC E 132-2000.

Equipos y accesorios:

Prensa de compresión, la capacidad de la prensa y su sistema para la medida de carga debe ser de 44.5 kN (10,000 lbf) o más y la precisión mínima en la medida debe ser de 44 N (10 lbf) o menos.

Molde de metal cilíndrico de 152,4 mm 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 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 este 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 divisiones 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.

Procedimientos:

Fase de la compactación:

- 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 este, 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 para obtener una familia de curvas que muestran la relación entre el peso específico, humedad y relación de capacidad de soporte.
- Si el espécimen se sumergirá, se toma una porción de material entre 100 y 500 g (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 será 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 esta 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 (cuatro días).
- Al final del periodo 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 ± 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 50 N (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 14.
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 E 132.

- Estas lecturas se hacen si se desea definir la forma de la curva, pero no son indispensables. Por último, se desmonta el molde y se toma de su parte superior, en la zona próxima 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 esta, 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 15.

Tabla 15.
Presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón.

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

Fuente: MTC E 132.

Se dibuja una curva que relacione las presiones (ordenadas) y las penetraciones (abscisas) y se observa si esta curva presenta un punto de inflexión. Si no presenta punto de inflexión se toman los valores correspondientes a 2,54 y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración. Si la curva presenta un punto de inflexión, la tangente en ese punto cortará el eje de abscisas en otro punto (o corregido), que se toma como nuevo origen para la determinación de las presiones correspondientes a 2,54 y 5,08 mm.

De la curva corregida, tómense los valores de esfuerzo-penetración para los valores de 2,54 mm y 5,08 mm y calcúlense los valores de relación de soporte correspondientes, dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia 6,9 MPa (1,000 lb/plg²) y 10,3 MPa (1,500 lb/plg²), respectivamente, y multiplíquese por 100. La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2,54 mm (0,1") de penetración. Cuando la relación a 5,08 mm (0,2") de penetración resulta ser mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, úsese la relación de soporte para 5,08 mm (0,2") de penetración.

Ecuaciones

La expansión se calcula con la siguiente expresión

$$\%Expansión = \frac{L2 - L1}{127}$$

Donde:

L1 = Lectura inicial en mm.

L2 = Lectura final en mm.

Ilustración 14.
Preparación del material para la muestra patrón.



Ilustración 15.
Compactado del molde de CBR con 10, 25 y 56 golpes.



Ilustración 16.
Pesado del mol de CBR, muestra compactada 56 golpes.



Ilustración 17.
Colocación del trípode para ensayo de expansión.



Ilustración 18.
Colocación de los moldes de CBR en la poza para ensayo de expansión.



Ilustración 19.
Preparación de la prensa de CBR para el ensayo de penetración, con apoyo del técnico de Daset.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICA MECÁNICAS DEL MATERIAL DE LA CANTERA

4.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

El contenido de humedad nos da una referencia para saber si es mayor o menor del contenido óptimo para compactar la subbase. Los contenidos de humedad obtenidos se muestran en la tabla 16 y las planillas de cálculo están adjuntadas en el anexo. En promedio, el contenido de humedad de la subbase es de 12.56%.

Tabla 16.
Resumen del contenido de humedad.

MUESTRAS	CANTERA	ORIGEN	W%
M1	C.1	Acopio	12.4%
M2	C.1	Acopio	13.8%
M3	C.1	CALICATA - 0 cm - 50 cm	15.6%
M4	C.1	CALITACA 0 cm - 50 cm	8.45%

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

Este ensayo nos sirve para clasificar los suelos y apreciar las distribuciones granulométricas del suelo. En la tabla se muestra el resumen de los ensayos para

las cuatro calicatas realizados sobre las muestras de la cantera extraídas para la verificación de la distribución granulométrica. Las muestras fueron extraídas de diferentes ubicaciones de la cantera 2 de acopio y de banco para verificar y existen diferencias saltantes.

Tabla 17.
Resultados de la granulometría muestra 1.

MUESTRA M-1					
Malla		RETENIDO		PASANTE	
Tamiz	mm	PESO	%	PESO	%
3"	76.2	0	0	7567.8	100
2"	50.8	1921.5	25.4%	5647.81	74.6%
1 1/2"	38.1	857.4	11.3%	4790.41	63.3%
1"	25.4	1776.3	23.5%	3014.11	39.8%
3/4"	19.05	620.6	8.2%	2393.51	31.6%
1/2"	12.7	793.1	10.5%	1600.41	21.1%
3/8"	9.525	348.5	4.6%	1251.91	16.5%
1/4"	6.35	450.3	5.9%	801.61	10.6%
N°4	4.763	415.3	5.5%	386.31	5.1%
N°10	2	85.89	1.1%	300.42	4.0%
N°20	0.84	56.12	0.7%	244.3	3.2%
N°30	0.59	109.3	1.4%	135	1.8%
N°40	0.426	38.3	0.5%	96.7	1.3%
N°60	0.25	12.3	0.2%	84.4	1.1%
N°100	0.149	65.2	0.9%	19.2	0.3%
N°200	0.074	19.2	0.3%	0	0.0%

Ilustración 20.
Curva granulométrica muestra 1.

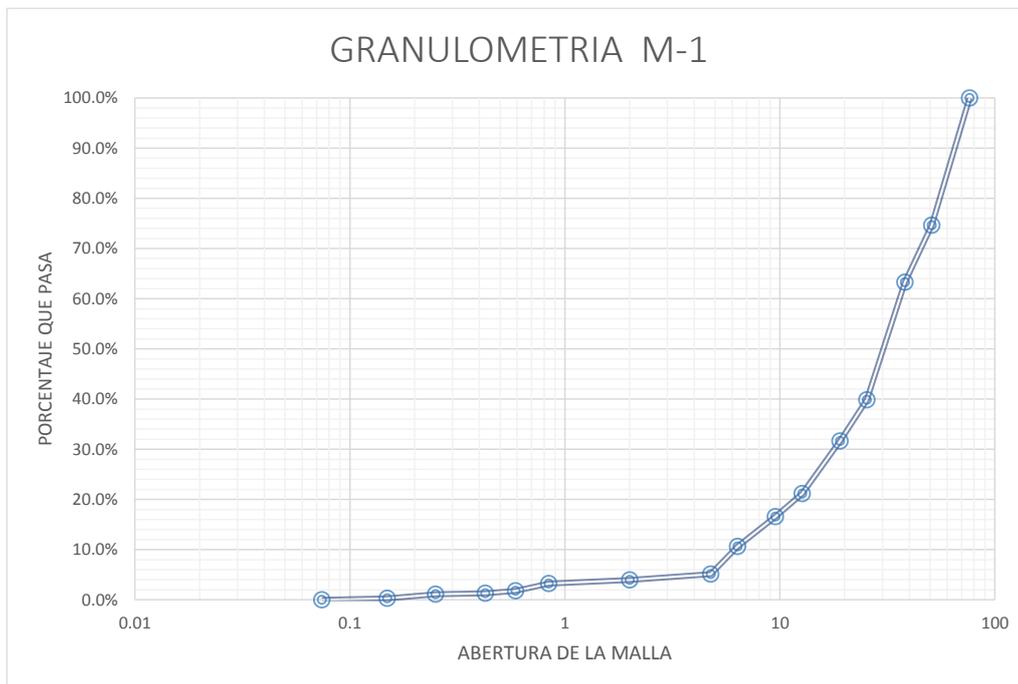


Tabla 18.
Resultados de la granulometría muestra 2.

MUESTRA M-2					
Malla		RETENIDO		PASANTE	
Tamiz	mm	PESO	%	PESO	%
3"	76.2	0	0	7494.931	100
2"	50.8	2015.5	26.6%	5479.431	72.4%
1 1/2"	38.1	913.45	12.1%	4565.981	60.3%
1"	25.4	1436.8	19.0%	3129.181	41.3%
3/4"	19.05	734.56	9.7%	2394.621	31.6%
1/2"	12.7	634.17	8.4%	1760.451	23.3%
3/8"	9.525	383.35	5.1%	1377.101	18.2%
1/4"	6.35	495.33	6.5%	881.771	11.6%
N°4	4.763	456.83	6.0%	424.941	5.6%
N°10	2	94.479	1.2%	330.462	4.4%
N°20	0.84	61.732	0.8%	268.73	3.6%
N°30	0.59	120.23	1.6%	148.5	2.0%
N°40	0.426	42.13	0.6%	106.37	1.4%
N°60	0.25	13.53	0.2%	92.84	1.2%
N°100	0.149	71.72	0.9%	21.12	0.3%
N°200	0.074	21.12	0.3%	0	0.0%

Ilustración 21.
Curva granulométrica muestra 2.

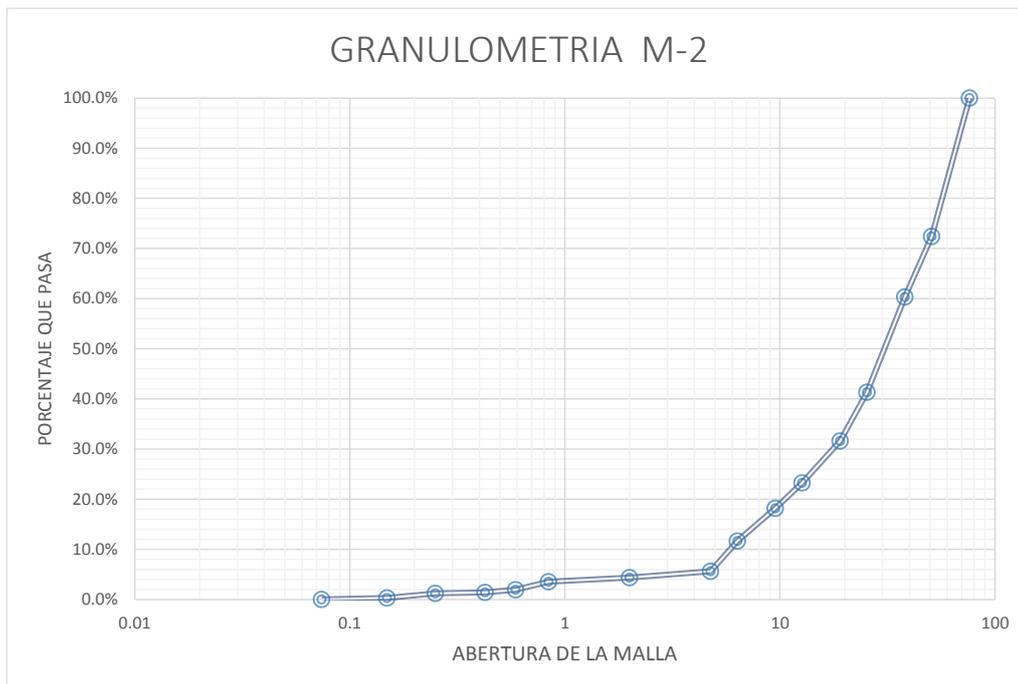


Tabla 19.
Resultados de la granulometría muestra 3.

MUESTRA M-3					
Malla		RETENIDO		PASANTE	
Tamiz	mm	PESO	%	PESO	%
3"	76.2	0	0	7380.53	100
2"	50.8	1873.24	24.7%	5507.29	72.8%
1 1/2"	38.1	956.4	12.6%	4550.89	60.1%
1"	25.4	1687.485	22.3%	2863.40	37.8%
3/4"	19.05	589.57	7.8%	2273.83	30.0%
1/2"	12.7	753.445	10.0%	1520.39	20.1%
3/8"	9.525	331.075	4.4%	1189.31	15.7%
1/4"	6.35	427.785	5.7%	761.53	10.1%
N°4	4.763	394.535	5.2%	366.99	4.8%
N°10	2	81.5955	1.1%	285.40	3.8%
N°20	0.84	53.314	0.7%	232.09	3.1%
N°30	0.59	103.835	1.4%	128.25	1.7%
N°40	0.426	36.385	0.5%	91.87	1.2%
N°60	0.25	11.685	0.2%	80.18	1.1%
N°100	0.149	61.94	0.8%	18.24	0.2%
N°200	0.074	18.24	0.2%	0.00	0.0%

Ilustración 22.
Curva granulométrica muestra 3.

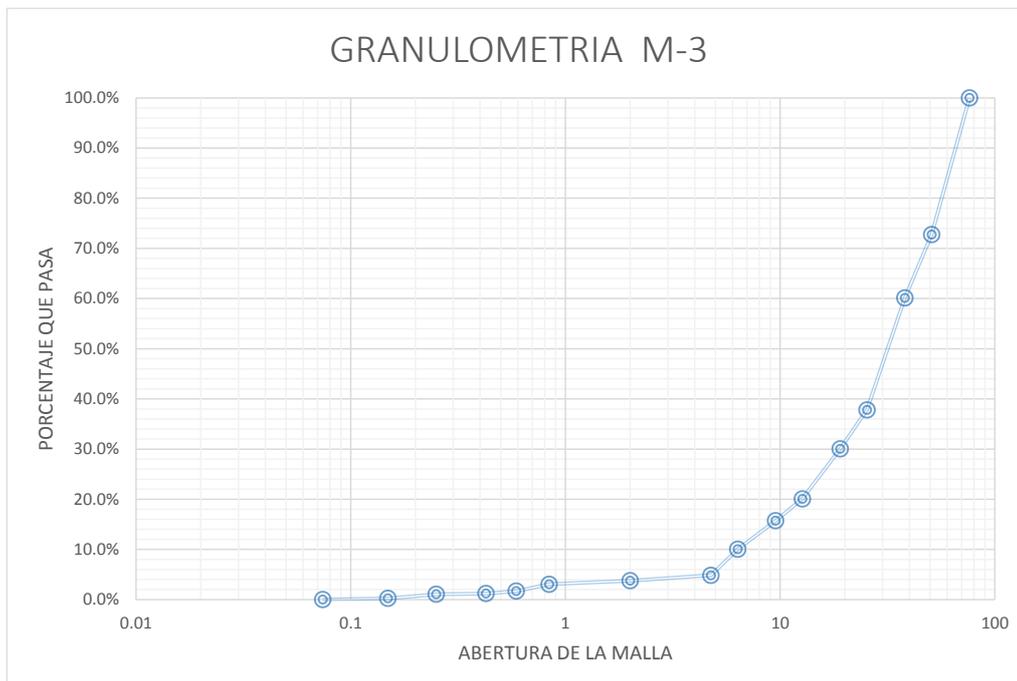


Tabla 20.
Resultados de la granulometría muestra 4.

MUESTRA M-4					
Malla		RETENIDO		PASANTE	
Tamiz	mm	PESO	%	PESO	%
3"	76.2	0	0	7584.82	100
2"	50.8	2345.34	31.0%	5239.48	69.2%
1 1/2"	38.1	1023.94	13.5%	4215.54	55.7%
1"	25.4	1445.3	19.1%	2770.24	36.6%
3/4"	19.05	720.6	9.5%	2049.64	27.1%
1/2"	12.7	745.2	9.8%	1304.44	17.2%
3/8"	9.525	448.5	5.9%	855.94	11.3%
1/4"	6.35	328.98	4.3%	526.96	7.0%
N°4	4.763	106.09	1.4%	420.87	5.6%
N°10	2	120.45	1.6%	300.42	4.0%
N°20	0.84	56.12	0.7%	244.3	3.2%
N°30	0.59	109.3	1.4%	135	1.8%
N°40	0.426	38.3	0.5%	96.7	1.3%
N°60	0.25	12.3	0.2%	84.4	1.1%
N°100	0.149	65.2	0.9%	19.2	0.3%
N°200	0.074	19.2	0.3%	0	0.0%

Ilustración 23.
Curva granulométrica muestra 4.

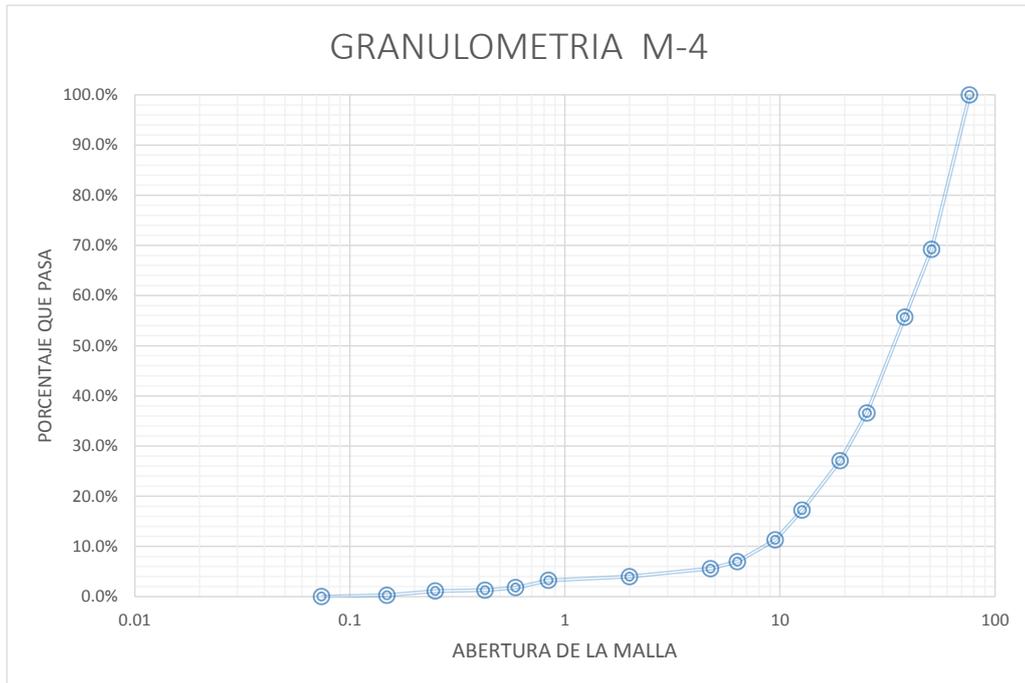
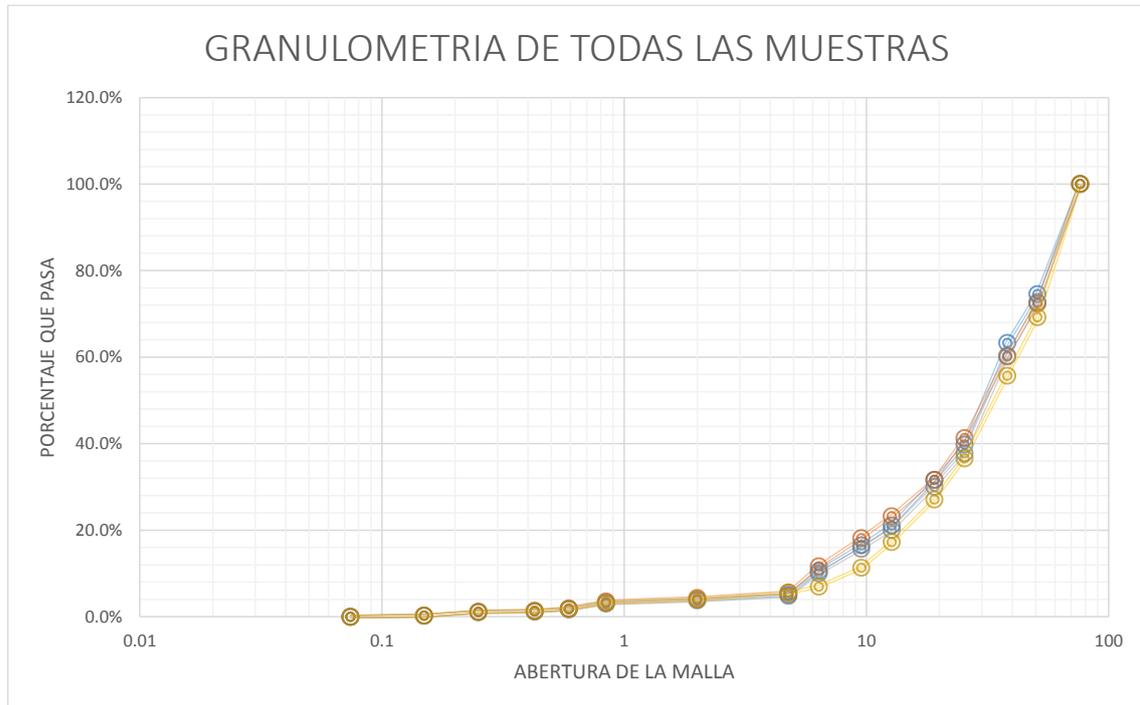


Tabla 21.
Resultados de la granulometría muestra 1, 2, 3 y 4.

RESUMEN GRANULOMETRIA - M1-4					
Tamiz	mm	%PASA	%PASA	%PASA	%PASA
3"	76.2	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
2"	50.8	74.6%	72.4%	72.8%	69.2%
1 1/2"	38.1	63.3%	60.3%	60.1%	55.7%
1"	25.4	39.8%	41.3%	37.8%	36.6%
3/4"	19.05	31.6%	31.6%	30.0%	27.1%
1/2"	12.7	21.1%	23.3%	20.1%	17.2%
3/8"	9.525	16.5%	18.2%	15.7%	11.3%
1/4"	6.35	10.6%	11.6%	10.1%	7.0%
N°4	4.763	5.1%	5.6%	4.8%	5.6%
N°10	2	4.0%	4.4%	3.8%	4.0%
N°20	0.84	3.2%	3.6%	3.1%	3.2%
N°30	0.59	1.8%	2.0%	1.7%	1.8%
N°40	0.426	1.3%	1.4%	1.2%	1.3%
N°60	0.25	1.1%	1.2%	1.1%	1.1%
N°100	0.149	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%
N°200	0.074	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Ilustración 24.
Curva granulométrica muestra 1, 2, 3 y 4.



Se aprecia de los resultados que las muestras corresponden a material granular gravas con presencia de finos en promedio. Se trata de un GP-GM.

Tabla 22.
Contenido del porcentaje por material.

Material	M1	M2	M3	M4
	Acopio		Banco	
Grava	94.90%	93.40%	92.66%	94.64%
Arena	4.85%	5.33%	4.61%	5.31%
Limo y arcilla	0.25%	1.26%	2.73%	0.05%

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. CLASIFICACIÓN SUCS Y AASHTO

Para la clasificación SUCS, se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes la malla 4, la malla 200. Para la clasificación AASHTO, se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes las mallas 10, 40 y 200. El cuadro siguiente muestra los resúmenes:

Tabla 23.
Clasificación de suelos.

Muestra	Zona	SUCS	AASHTO
M-1	Acopio	GM (grava limosa).	A-1-(a)
M-2		GM (grava limosa).	A-1-(a)
M-3	Calicata	GM (grava limosa).	A-1-(a)
M-4		GM (grava limosa).	A-1-(a)

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. ENSAYO PROCTOR

Se determinó la relación del contenido de humedad y el peso específico seco, obteniendo la curva de compactación del suelo para determinar la densidad seca máxima para un contenido de humedad óptimo. En la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de proctor modificado al material de cantera.

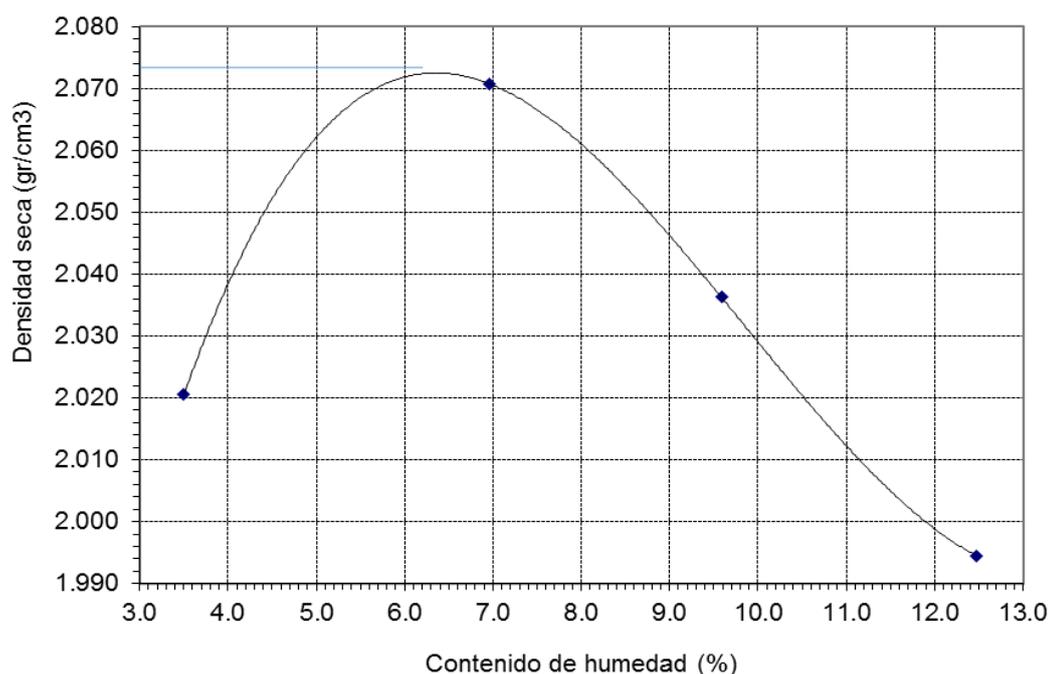
Tabla 24.
Resultados de proctor.

ENSAYO DE COMPACTACION				ASTM D1557	
Peso suelo + molde	7480	7740	7775	7800	
Peso del molde	3080	3080	3080	3080	
Peso suelo humedo compactado	4400	4660	4695	4720	
Peso volumetrico humedo	2.091	2.215	2.231	2.243	
Peso suelo humedo + tara	96.8	84.1	72.8	85.7	
Peso suelo seco + tara	94.3	80.1	68.4	78.7	
Tara	22.9	22.6	22.5	22.6	
Peso del agua	2.5	4	4.4	7	
Peso suelo seco	71.4	57.5	45.9	56.1	
Contenido de agua	3.50	6.96	9.59	12.48	
Peso volumetrico seco	2.021	2.071	2.036	1.994	
MAXIMA DENSIDAD SECA (gr/cm3)				2.072	gr/cm3
OPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (%)				6.20%	

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 26 se muestra la relación del contenido de humedad y la densidad seca del ensayo proctor con material del primer tramo. En la figura 6 se muestra la relación del contenido de humedad y la densidad seca del material del segundo tramo.

Ilustración 25.
Curva de proctor de la muestra patrón.



4.1.5. ENSAYO CBR

Este ensayo es el más determinante e importante para la presente investigación. El ensayo de CBR se hizo sobre la muestra patrón, y luego se repite el mismo ensayo con diferentes porcentajes en peso de fibra PET. Para ver el efecto de las adiciones sobre el valor de soporte de california del suelo.

4.1.5.1. Ensayo CBR de la muestra patrón sin aditivo

a. Cálculo del CBR sin aditivo

Como se describió en la parte de la metodología aplicada para determinar la capacidad portante de cada tramo, se realizaron ensayos de CBR.

Generalmente, se realizan ensayos con tres moldes variando la energía de compactación con el número de golpes, pero para esta investigación se hicieron tres especímenes para tener resultados confiables. Para la presente investigación para determinar el ensayo de CBR, se prepararon tres moldes con la misma energía de compactación de 56 golpes, 25 golpes y 10 golpes, para luego determinar el promedio.

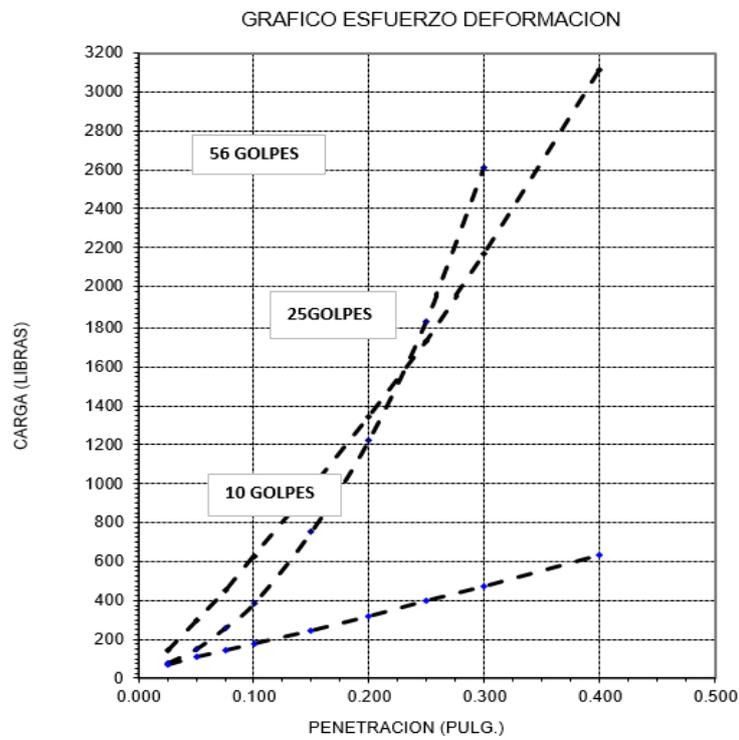
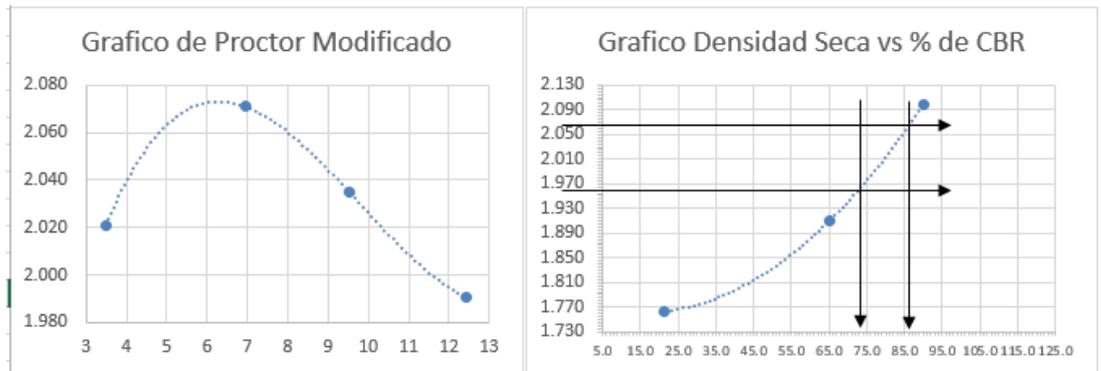
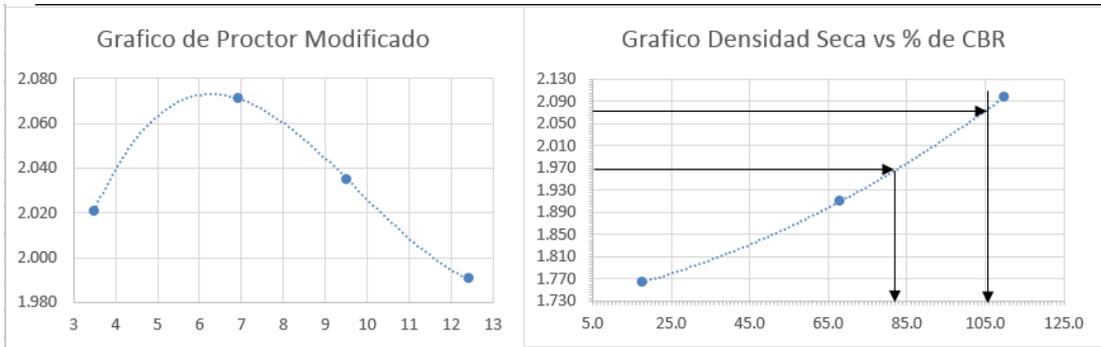
En la tabla 25 se muestra el resumen de los resultados del ensayo de CBR, sumergido a cuatro días por tratarse de suelos granulares con una sobrecarga de 4,5 kg. Se determinó el porcentaje de expansión y absorción, además del valor del CBR al 95% y al 100% de la DMS (densidad máxima seca) y a una penetración de 0.1". Los resultados obtenidos son muy importantes para comparar con los resultados obtenidos con la adición de polímeros reciclados.

Tabla 25.
Resumen del ensayo CBR de la muestra patrón.

PENETRACION	56 GOLPES			25 GOLPES			10 GOLPES			
	PULG	Kg	LBS	LBS/PUL2	Kg	LBS	LBS/PUL2	Kg	LBS	LBS/PUL2
0.025		106.3	234.3915	78.1305	200.3	441.6615	147.2205	99.4	219.177	73.059
0.05		205.7	453.5685	151.1895	403.8	890.379	296.793	151.2	333.396	111.132
0.075		351.6	775.278	258.426	619.3	1365.5565	455.1855	193.8	427.329	142.443
0.1		521.8	1150.569	383.523	854.9	1885.0545	628.3515	239.5	528.0975	176.0325
0.15		1023.4	2256.597	752.199	1328.5	2929.3425	976.4475	336.2	741.321	247.107
0.2		1662.5	3665.8125	1221.9375	1831.8	4039.119	1346.373	436.4	962.262	320.754
0.25		2497.4	5506.767	1835.589	2359.8	5203.359	1734.453	538.5	1187.3925	395.7975
0.3		3548.7	7824.8835	2608.2945	2947.4	6499.017	2166.339	639.4	1409.877	469.959
0.4					4235.6	9339.498	3113.166	865.3	1907.9865	635.9955
0.5								1086.9	2396.6145	798.8715

Ilustración 26.

A) Penetración a 0.10 pulgadas. B) Penetración a 0.20 pulgadas. C) Determinación del CBR al 95% de la DMS.



4.2. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN Y USO ADECUADO DE LOS POLÍMEROS RECICLADOS COMO ADITIVO

4.2.1. OBTENCIÓN DE POLÍMEROS RECICLADOS PARA EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Primer paso: reciclaje

Se reciclaron todas las botellas descartables que tenían plasmados en la parte inferior el símbolo de reciclaje que se muestra en la imagen 1.

Segundo paso: lavado y secado

Por lo general, las botellas recicladas estaban sucias y se tuvieron que lavar y luego secar al aire libre.

Tercer paso: obtención del aditivo PET reciclado

Para la obtención del polímero para utilizar como aditivo, se debió cortar de forma de fibras de diferentes dimensiones. Para realizar el corte, se usó una cizalla manual de papel para obtener los polímeros reciclados en cortes de diferentes dimensiones de forma casera. Existen también máquinas como la trituradora, pero no existen en el mercado local y normalmente tritura en hojuelas y la investigación requería fibra, así que se hizo manualmente.

Tamaño y forma:

Tamaño mínimo: el tamaño mínimo se estableció por lo más delgado que podía cortar la cizalla de papel y el cepillo de ebanista.

Tamaño máximo: el tamaño máximo se estableció por la trabajabilidad, pues, al mezclar con la graba, se debía compactar y tamaños grandes no permitían realizar esas procedimientos.

Ilustración 27.
Obtención del aditivo PET con el uso de cizalla de papel.



Del total del peso de las botellas recicladas, se utilizó solo el 75% en peso, debido a que la parte inferior y superior de las botellas se descartan por la dificultad de ser cortados.

Ilustración 28.
Obtención del aditivo PET con el uso de cepillo de madera.



4.2.2. COSTO DE LA OBTENCIÓN DEL ADITIVO

Se realizó el análisis de costo unitario para el aditivo PET, aunque el costo del reciclaje de las botellas descartables es relativamente bajo, pero se incrementa considerablemente con la mano de obra. A continuación se muestra el análisis de costo unitario de forma artesanal e industrial.

El precio unitario de manera artesanal es de 140.70 soles por kilogramo, para el cual se consideró el precio de las botellas recicladas en Huancayo de 0.625 soles por kilogramo, un rendimiento de 0.5 kg/día. El corte fue realizado con una cizalla operado por un peón.

a. Cálculo analítico de costo de producción artesanal

Costo por hora hombre peón: S/ 8.5 HH

Rendimiento real calculado en la preparación de fibra para la tesis 0.50 kg/día, por lo cual 1 kg de fibra se haría en dos días, equivalente a 16 horas peón.

Costo de la mano de obra por 1 kg de fibra 16 horas x S/ 8.5/horas = 136 soles. Si le sumamos el costo del equipo y el costo del material como se explica en el cuadro el costo final es de S/ 140.70 kg.

Tabla 26.
Costo unitario de la producción artesanal de fibra por kilogramo.

Obtención del polímero reciclado PET	Artesanal	Costo unitario directo por		Kg	140.70 soles
		Cuadrilla	Cantidad		
Código descripción recurso	Unidad			Precio	Parcial
Mano de obra	Hh	1	16	8.50	136
Materiales	Kg		1	0.625	0.625
Equipos	%MO		3	4.08	4.08
Herramientas manuales					

Se ha averiguado sobre equipos disponibles en el mercado para la producción industrial. Solo se ha encontrado equipo mediano con producciones promedio de 50 kg/día.

b. Cálculo analítico de costo de producción industrial

Costo por hora equipo: S/ 25.00 HM

Rendimiento estimado en la preparación de fibra para la tesis 50.00 kg/día, por lo cual 1 kg de fibra se haría en 0.16 HM (jornada/rendimiento).

Costo mano de obra por 1 kg de fibra 0.16 horas x S/ 25/horas = 4 soles

Si le sumamos el costo del equipo y el costo del material como se explica en el cuadro, el costo final es de S/ 6.02 kg.

El precio unitario de manera industrial es de 6.02 nuevos soles por kilogramo, para el cual se consideró el precio de las botellas recicladas en Huancayo de S/ 0.625 por kilogramo, un rendimiento de 50 kg/día con la trituradora PET industrial.

Tabla 27.
Costo unitario de la producción industrial de fibra por kilogramo.

" obtención del polímero reciclado		Costo unitarioKg			6.02 soles
PET- industrial rendimiento 50 kg/día		Costo directo por:			
Código descripción recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
liviano de obra					
Peón	Hh	1.0	0.16	8.50	1.36
					1.36
Materiales					
Botellas descartables	Kg		1	0.625	0.625
					0.625
Equipos					
Herramientas manuales	%MO		3	0.0204	0.0408
Trituradora PET fibra	Hm	1	0.16	25.00	4.00
					6.0258

Se adicionaron polímeros reciclados PET en diferentes dimensiones y porcentajes con el objetivo de encontrar una dosificación óptima cuantificada en valor de soporte (CBR).

4.2.3. CÁLCULO DEL CBR CON ADICIÓN CON ADITIVO

a.1. 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 para conseguir la dosificación óptima suelo-polímero, para luego cuantificarlo en función al índice del CBR. La forma definida fue en fibras de 2 a 5 centímetros de largo de espesor de 1 a 3 mm.

Ilustración 29.
Pesado de la fibra para mezcla.



Tabla 28.
Tabla de dosificación de polímeros reciclados.

TABLA DE DOSIFICACION DE POLIMEROS RECICLADOS					
TIPO 1	% PESO POLIMERO RECICLADO	MOLDE DE CBR		POR M3	
		PESO DE LA MUESTRA MATERIAL GRANULAR (gr)	PESO DEL POLIMERO RECICLADO (gr)	PESO VOLUMETRIC DEL MATERIAL GRANULAR EN (Kg/m3)	PESO DEL POLIMERO RECICLADO (Kg)
	A	B	A x B	C	A x C
1	0.50%	6,000	30	2,200	11
2	0.75%	6,000	45	2,200	17
3	1.00%	6,000	60	2,200	22
4	1.25%	6,000	75	2,200	28
5	1.50%	6,000	90	2,200	33
6	1.75%	6,000	105	2,200	39

Tabla 29.

Tabla resumen de resultados de CBR, para diferentes porcentajes de adición de fibra.

CUADRO RESUMEN DE RESULTADOS DE CBR

	% FIBRA 0.5		% FIBRA 0.75		% FIBRA 1		% FIBRA 1.25		% FIBRA 1.5		% FIBRA 1.75	
	95% MDS	100% MDS	95% MDS	100% MDS	95% MDS	100% MDS	95% MDS	100% MDS	95% MDS	100% MDS	95% MDS	100% MDS
LARGO												
2 CM	54.90	61.47	55.62	62.22	48.28	58.90	44.19	53.86	42.00	47.03	16.05	17.13
	29.54	31.09	54.23	64.43	66.57	80.37	41.30	46.15	36.20	40.06	22.98	24.42
	59.50	69.99	43.93	50.65	57.36	67.10	35.50	38.57	37.10	41.40	24.00	26.04
CBR PROMEDIO	47.98	54.18	51.26	59.10	57.40	68.79	40.33	46.19	38.43	42.83	21.01	22.53
3 CM	66.15	77.72	79.36	88.68	85.92	93.15	77.88	84.18	55.60	61.73	43.05	45.80
	40.09	48.08	77.97	89.43	91.62	100.65	79.06	87.83	56.70	64.61	52.98	57.50
	70.76	82.56	67.67	78.58	77.36	86.59	71.86	77.14	60.70	67.86	46.10	50.88
CBR PROMEDIO	59.00	69.45	75.00	85.56	84.97	93.46	76.27	83.05	57.67	64.73	47.38	51.39
4 CM	63.15	73.09	69.39	79.62	52.92	60.06	54.88	61.22	42.60	47.15	29.20	31.27
	37.09	42.72	67.97	77.69	72.62	83.79	46.06	51.64	52.70	57.46	36.70	38.56
	67.76	77.67	57.67	73.20	59.36	70.99	49.05	56.05	61.50	69.09	29.70	31.21
CBR PROMEDIO	56.00	64.49	65.01	76.84	61.63	71.61	50.00	56.30	52.27	57.90	31.87	33.68
5 CM	54.20	62.15	60.40	69.41	40.92	50.32	35.90	38.73	20.00	21.08	16.10	16.80
	28.10	38.39	59.00	65.42	62.62	72.53	31.10	34.86	21.10	22.20	22.60	23.83
	58.80	69.20	48.70	56.58	53.36	65.61	33.90	37.74	25.20	30.30	15.30	16.48
CBR PROMEDIO	47.03	56.58	56.03	63.80	52.30	62.82	33.63	37.11	22.10	24.53	18.00	19.04

Ilustración 30.

Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 2 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.

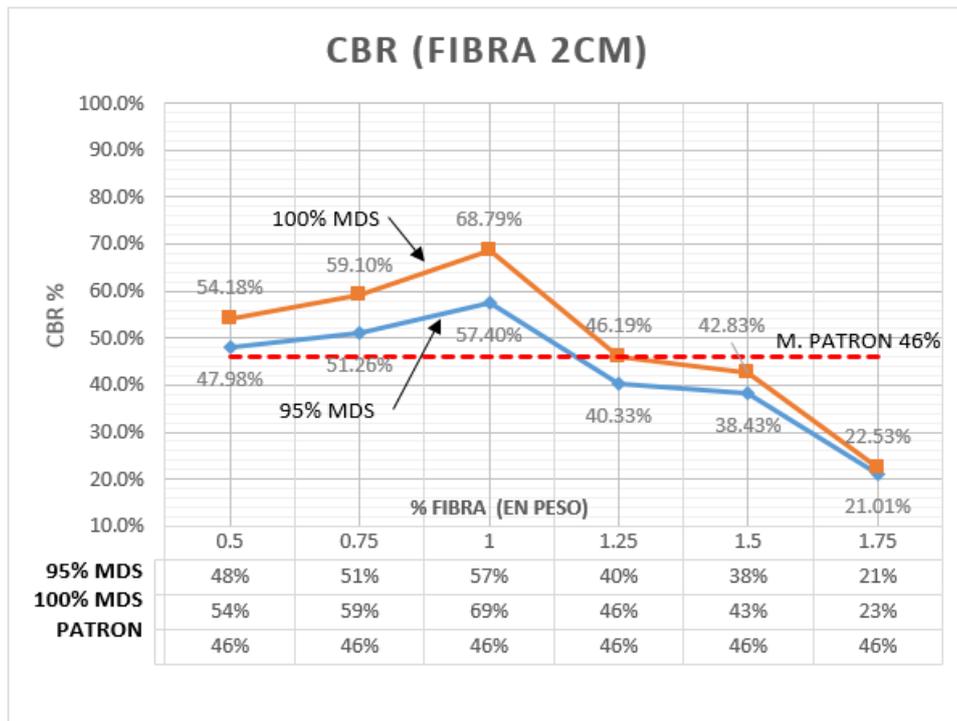


Ilustración 31.

Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 3 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.

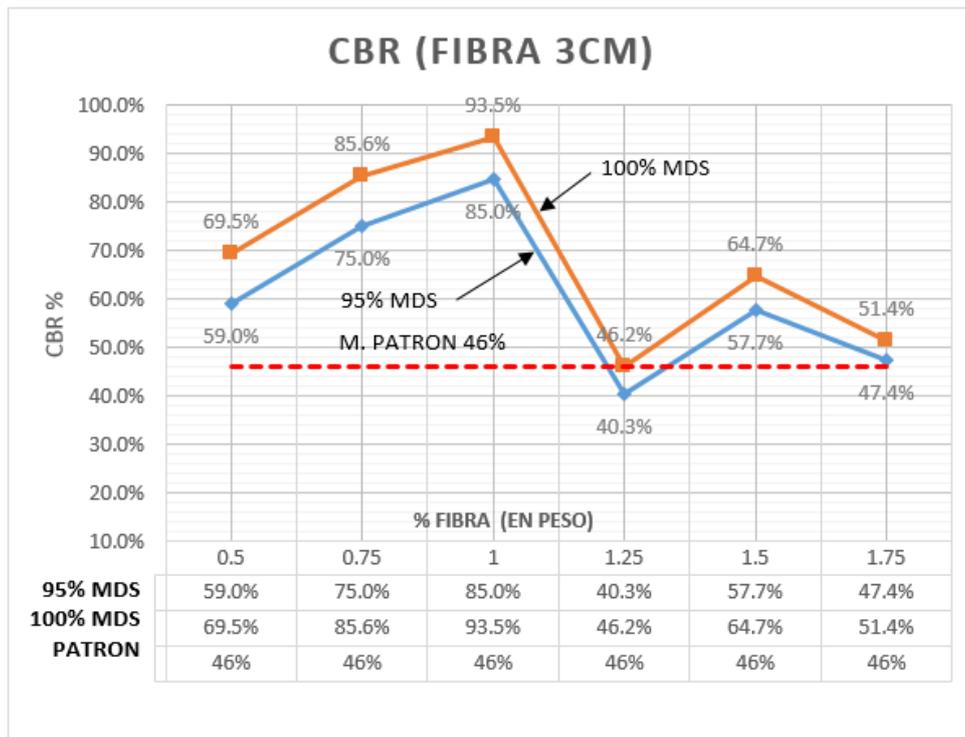


Ilustración 32.

Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 4 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.

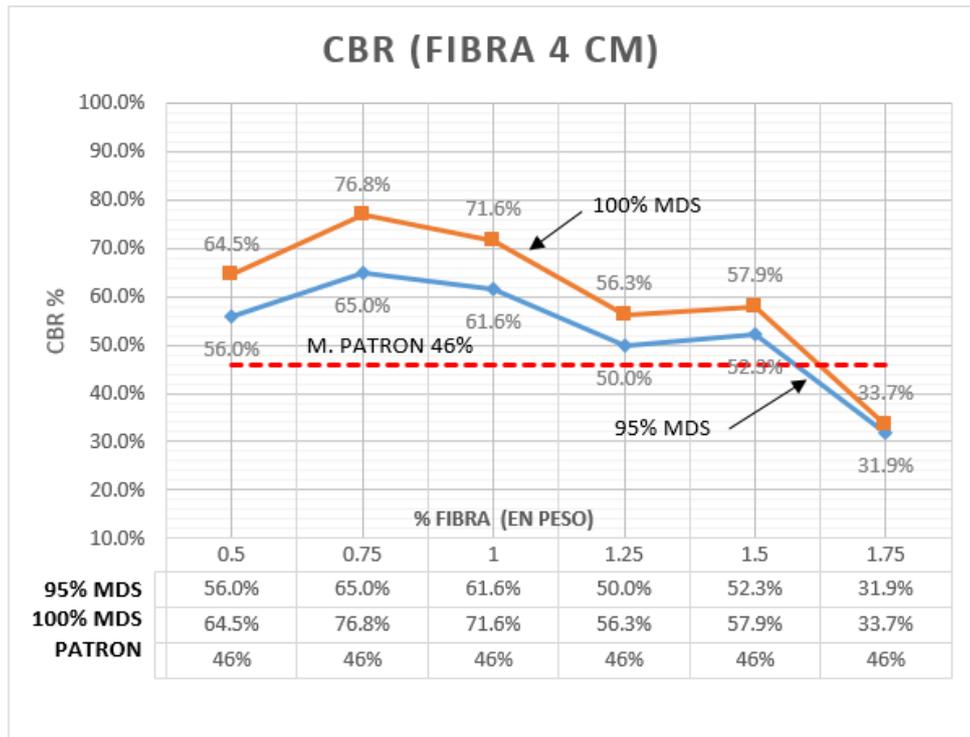


Ilustración 33.

Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 5 centímetros, al 95% MDS y al 100% MDS.

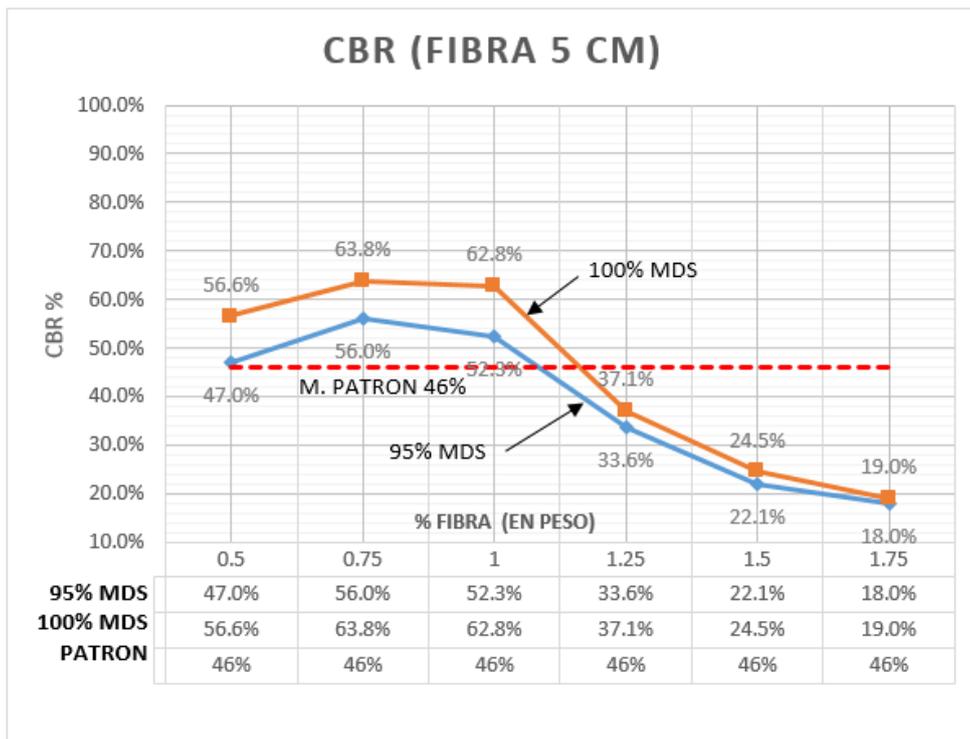
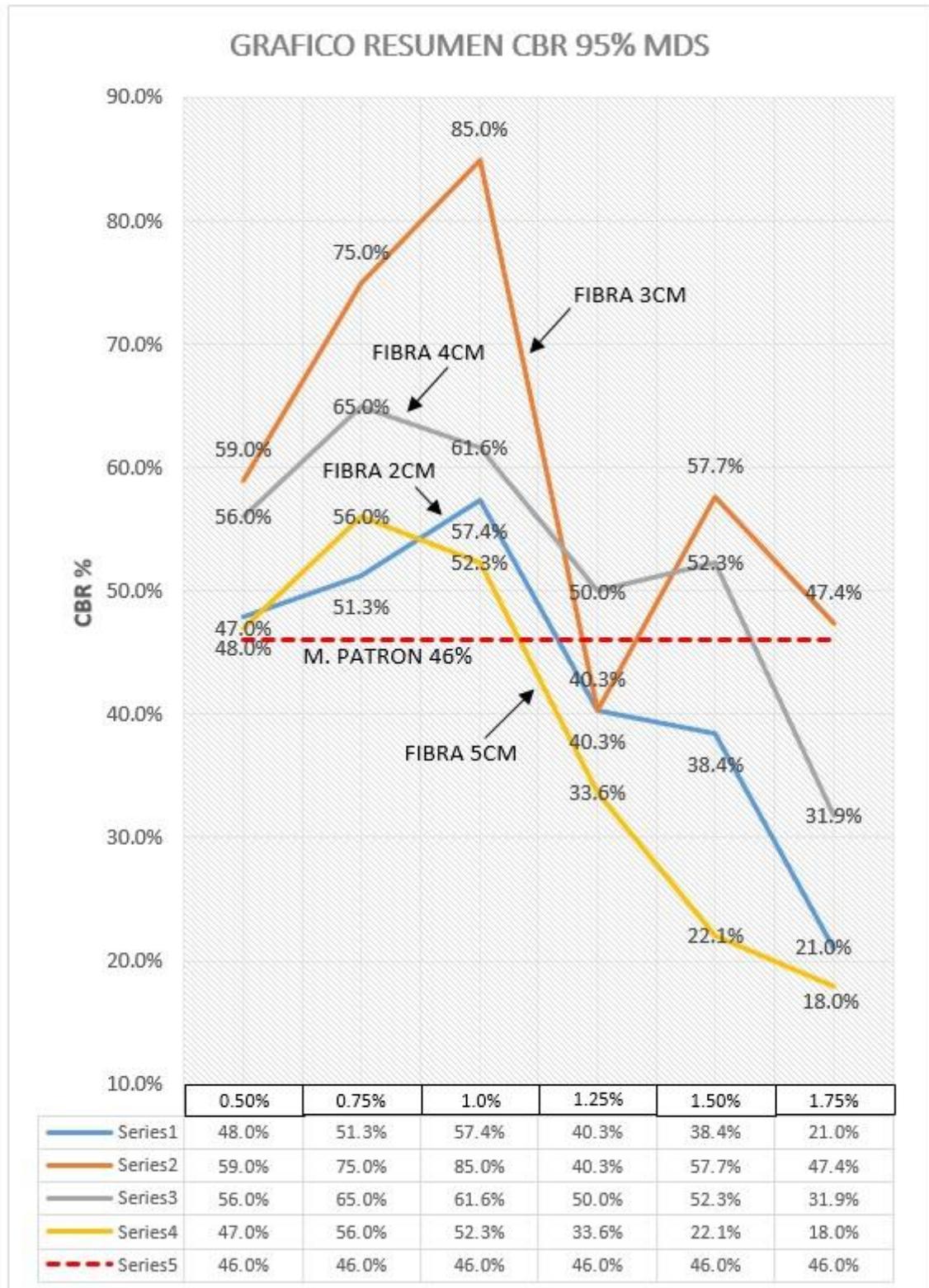
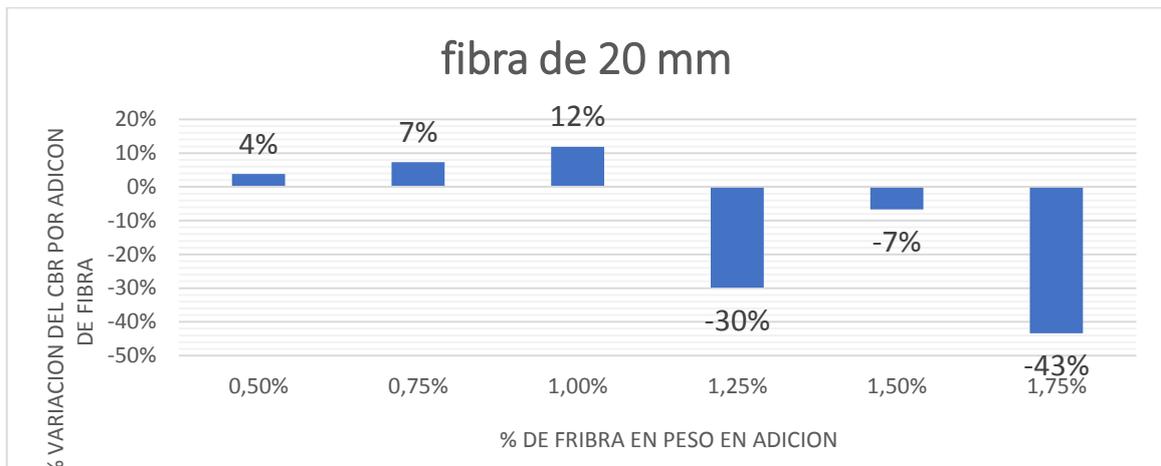


Ilustración 34.
Valores de CBR para diferentes porcentajes de adición de fibra de 2 a 5 centímetros, al 95% MDS.

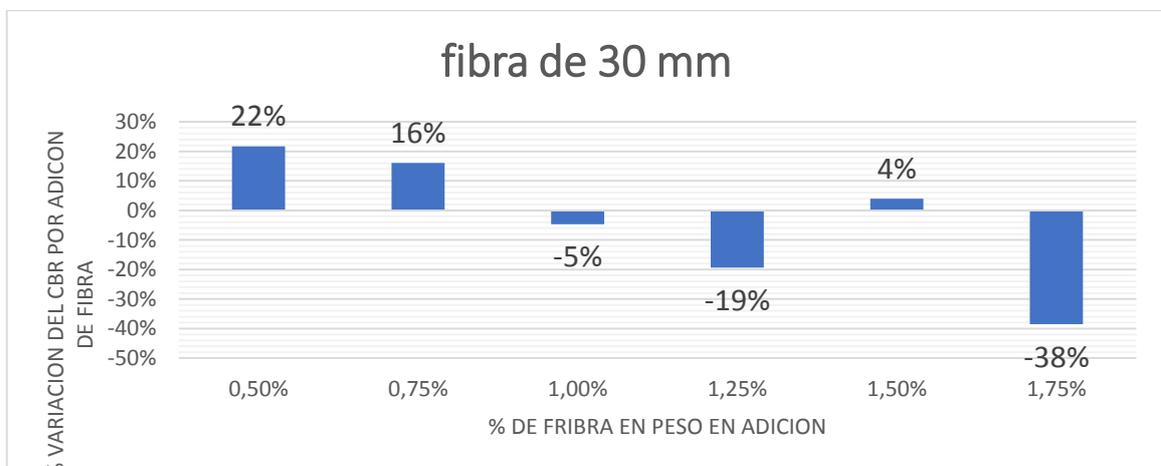


4.2.4. DIFERENCIAS OBTENIDAS ENTRE EL USO DEL ADITIVO DE LOS POLÍMEROS RECICLADOS

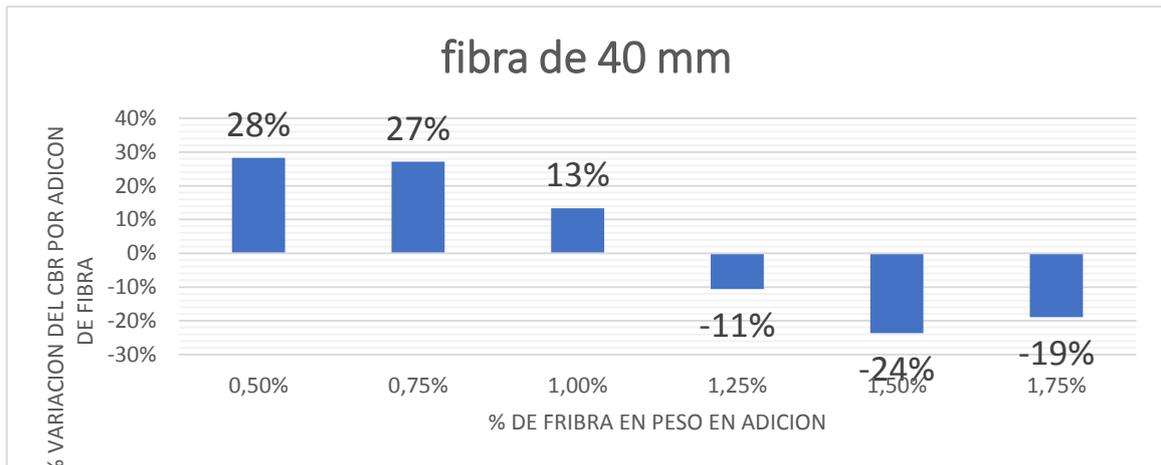
Con la adición de los polímeros reciclados (PR) de 20 mm, se incrementó porcentualmente la capacidad portante en términos de CBR hasta un 12%, lograda para una dosificación de 1.00%, a partir del 1.25% se obtuvo un efecto contrario de disminución del CBR hasta de un -43%.



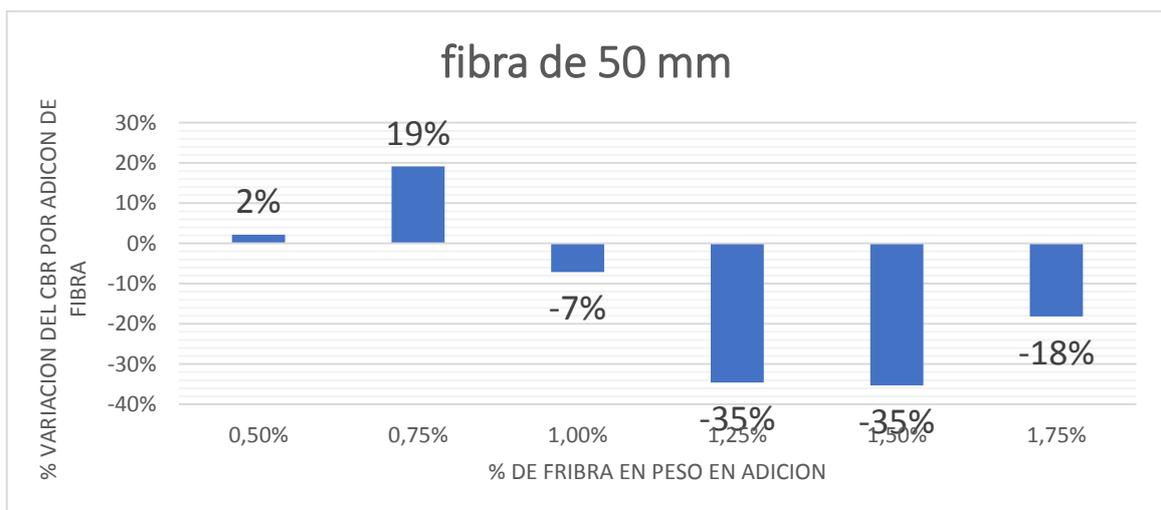
Con la adición de los polímeros reciclados (PR) de 30 mm se incrementó porcentualmente la capacidad portante en términos de CBR hasta un 22%, lograda para una dosificación de 0.50%, a partir del 1.00% se obtuvo un efecto contrario de disminución del CBR hasta de un -19%.



Con la adición de los polímeros reciclados (PR) de 40 mm se incrementó porcentualmente la capacidad portante en términos de CBR hasta un 28%, lograda para una dosificación de 0.50%, a partir del 1.25% se obtuvo un efecto contrario de disminución del CBR hasta de un -24%.



Con la adición de los polímeros reciclados (PR) de 50 mm se incrementó porcentualmente la capacidad portante en términos de CBR hasta un 19%, lograda para una dosificación de 0.75%, a partir del 1.00% se obtuvo un efecto contrario de disminución del CBR hasta de un -35%.

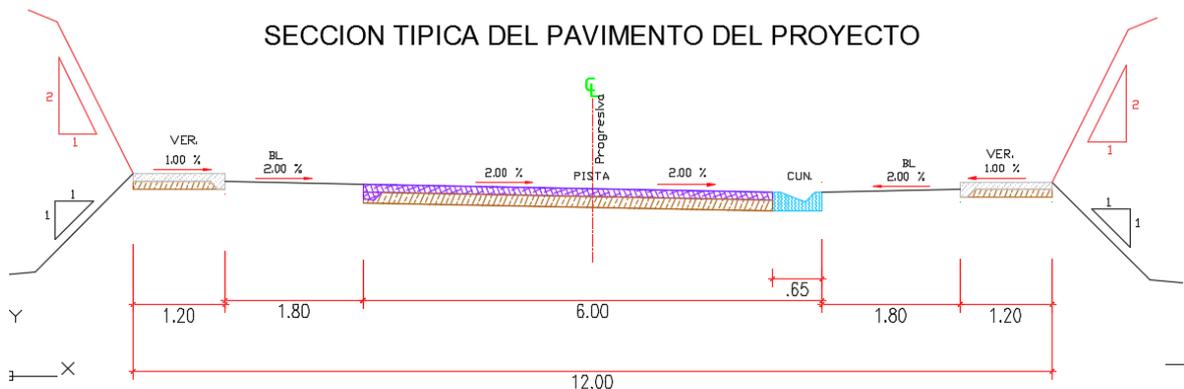


4.2.5. EFECTO EN EL ESPESOR Y EL COSTO DEL PAVIMENTO

En el anteproyecto se tuvieron en cuenta dos posibilidades, pavimento flexible y pavimento rígido. Por último, se decidió por la segunda alternativa, ofrecida por la empresa chilena Aplica. Sin embargo, para el análisis estructural de nuestra investigación, trabajamos con las dos alternativas.

Para el diseño de pavimentos del proyecto se trataron dos alternativas:

- Pavimento flexible: subbase, base granular y carpeta asfáltica.
- Pavimento concreto: base granular y losa de concreto simple.



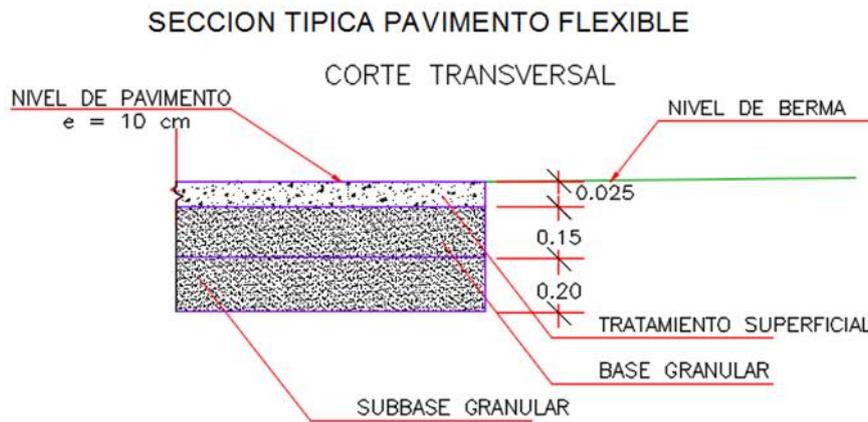
Alternativa 1:

Subrasante : clasificación suelo fino ML, CBR 6%, $M_r = 8,042$ PSI

Subbase: CBR: 40%, espesor 22.50 cm

Base granular: CBR: (0%, espesor 12.5 cm

Carpeta asfáltica: 5 CM. Módulo elástico 450,000 psi



Alternativa 2:

Subrasante: clasificación suelo fino ML, CBR 6%, $M_r = 8,042$ PSI

Base granular: CBR: 40%, espesor 15 cm

Losa de concreto: $F'c = 300$ KG/CM², espesor: 10 cm

a. Cálculo del efecto estructural en el pavimento por adición de fibra

Para el cálculo del efecto del polímero en el CBR, se utilizaron los promedios de aportes de las dosificaciones positivas de cada medida de fibra en longitud:

Pavimentos flexibles:

• **Aporte fibra de 2 cm** = $(4 + 7 + 12)/3 = 7.6\%$ CBR mejorado = $46 + 7.60 = 53.60\%$

Espesor de la subbase normal = 22.50 cm $a_1 = 0.119$

Espesor de la subbase con aditivo = 21.00 cm $a_1 = 0.127$

Ahorra en espesor de subbase = 1.50 cm

Ahorro en costo por m³ (S/ 135 m³) = S/ 2.025 m² subbase

Costo del aditivo por m³ (S/ 6.02 kg) = S/ 1.806 m² (industrializado)

Costo del aditivo por m³ (S/ 140.70 m³) = S/ 42.21 m² (artesanal)

fibra de 2 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG/M2	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPESOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	1.50	0.015	0.300	42.21
INDUSTRIAL	6.02	20	1.50	0.015	0.300	1.806

• **Aporte fibra de 3 cm** = $(22 + 16)/2 = 16.0\%$ CBR mejorado = $46 + 16.0 = 62.00\%$

Espesor de la subbase normal = 22.50 cm a1 = 0.119

Espesor de la subbase con aditivo = 20.00 cm a1 = 0.134

Ahorra en espesor de subbase = 2.50 cm

Ahorro en costo por m3 (S/ 135 m3) = S/ 3.375 m2

Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 kg) = S/ 3.010 m2 (industrializado)

Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 m3) = S/ 70.35 m2 (artesanal)

fibra de 3 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPESOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	2.50	0.025	0.500	70.35
INDUSTRIAL	6.02	20	2.50	0.025	0.500	3.01

• **Aporte fibra de 4 cm** = $(28 + 27 + 13)/3 = .6\%$ CBR mejorado = $46 + 26.66 = 68.66\%$

Espesor de la subbase normal = 22.50 cm a1 = 0.119

Espesor de la subbase con aditivo = 19.80 cm a1 = 0.135

Ahorra en espesor de subbase = 2.70 cm

Ahorro en costo por m3 (S/ 135 m3) = S/ 3.645 m2

Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 kg) = S/ 3.2508 m2 (industrializado)

Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 kg) = S/ 75.978 m2 (artesanal)

fibra de 4 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPESOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	2.70	0.027	0.540	75.978
INDUSTRIAL	6.02	20	2.70	0.027	0.540	3.2508

• **Aporte fibra de 5 cm** = $(2 + 19)/2 = 10.50\%$ CBR mejorado = $46 + 10.5 = 56.60\%$

Espesor de la subbase normal = 22.50 cm a1 = 0.119

Espesor de la subbase con aditivo = 20.50 cm a1 = 0.131

Ahorra en espesor de subbase = 2.00 cm

Ahorro en costo por m3 (S/ 135 m3) = S/ 2.700 m2

Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 kg) = S/ 2,4080 m2 (industrializado)

Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 kg) = S/ 56.280 m2 (artesanal)

fibra de 5 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG	COSTO ADITIVO S/. POR M2
	COSTO SOLES/KG		ESPELOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	2.00	0.02	0.400	56.28
INDUSTRIAL	6.02	20	2.00	0.02	0.400	2.408

Pavimentos rígidos:

• **Aporte fibra de 2 cm** = $(4 + 7 + 12)/3 = 7.6\%$ CBR mejorado = $46 + 7.60 = 53.60\%$

Espesor de la subbase normal = 15.00 cm Kc = 300

Espesor de la losa normal = 10.00 cm Kc = 319

Espesor de la losa con base mejorada = 9.83 cm

Ahorra en espesor de losa = 0.17 cm

Ahorro en costo por m3 (S/ 350 m3) = S/ 0.595 m2

Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 Kg) = S/ 18.06 m2 (industrializado)

Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 kg) = S/ 422.10 m2 (artesanal)

fibra de 2 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG/M2	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPELOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	15.00	0.15	3.000	422.1
INDUSTRIAL	6.02	20	15.00	0.15	3.000	18.06

• **Aporte fibra de 3 cm** = $(22 + 16)/2 = 16.0\%$ CBR mejorado = $46 + 16.0 = 62.00\%$

Espesor de la subbase normal = 15.00 cm Kc = 300

Espesor de la losa normal = 10.00 cm Kc = 337
 Espesor de la losa con base mejorada = 9.525 cm
 Ahorra en espesor de losa = 0.475 cm
 Ahorro en costo por m3 (S/ 350 m3) = S/ 1.66 m2
 Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 kg) = S/ 18.06 m2 (industrializado)
 Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 kg) = S/ 422.10 m2 (artesanal)

fibra de 2 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG/M2	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPESOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	15.00	0.15	3.000	422.1
INDUSTRIAL	6.02	20	15.00	0.15	3.000	18.06

• **Aporte fibra de 4 cm** = $(28 + 27 + 13)/3 = .6\%$ CBR mejorado = $46 + 26.66 = 68.66\%$

Espesor de la subbase normal = 15.00 cm Kc = 300
 Espesor de la losa normal = 10.00 cm Kc = 337
 Espesor de la losa con base mejorada = 9.0424 cm
 Ahorra en espesor de losa = 0.9576 cm
 Ahorro en costo por m3 (S/ 350 m3) = S/ 3.35 m2
 Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 Kg) = S/ 18.06 m2 (industrializado)
 Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 kg) = S/ 422.10 m2 (artesanal)

fibra de 2 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG/M2	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPESOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	15.00	0.15	3.000	422.1
INDUSTRIAL	6.02	20	15.00	0.15	3.000	18.06

• **Aporte Fibra de 5 cm** = $(2 + 19)/2 = 10.50\%$ CBR mejorado = $46 + 10.5 = 56.60\%$

Espesor de la subbase normal = 15.00 cm Kc = 300
 Espesor de la losa normal = 10.00 cm Kc = 323
 Espesor de la losa con base mejorada = 9.753 cm

Ahorra en espesor de losa = 0.247 cm
 Ahorro en costo por m3 (S/ 350 m3) = S/ 0.864 m2
 Costo del aditivo por m3 (S/ 6.02 kg) = S/ 18.06 m2 (industrializado)
 Costo del aditivo por m3 (S/ 140.70 kg) = S/ 422.10 m2 (artesanal)

fibra de 2 cm						
PARA UN PESO VOLUMETRICO DE 2000 KG/M3		CANTIDAD REQUERIDA KG/M3	AHORRO		CANTIDAD REQUERIDA KG/M2	COSTO ADITIVO S/. POR M2
COSTO DEL ADITIVO	COSTO SOLES/KG		ESPESOR CAPA CM	VOLUMEN CAPA M3		
ARTESANAL	140.7	20	15.00	0.15	3.000	422.1
INDUSTRIAL	6.02	20	15.00	0.15	3.000	18.06

Ilustración 35.

Costo en la capa de subbase con aditivo y sin él, para una longitud de 200 ml y aun ancho de 5.20 m, pavimento flexible.

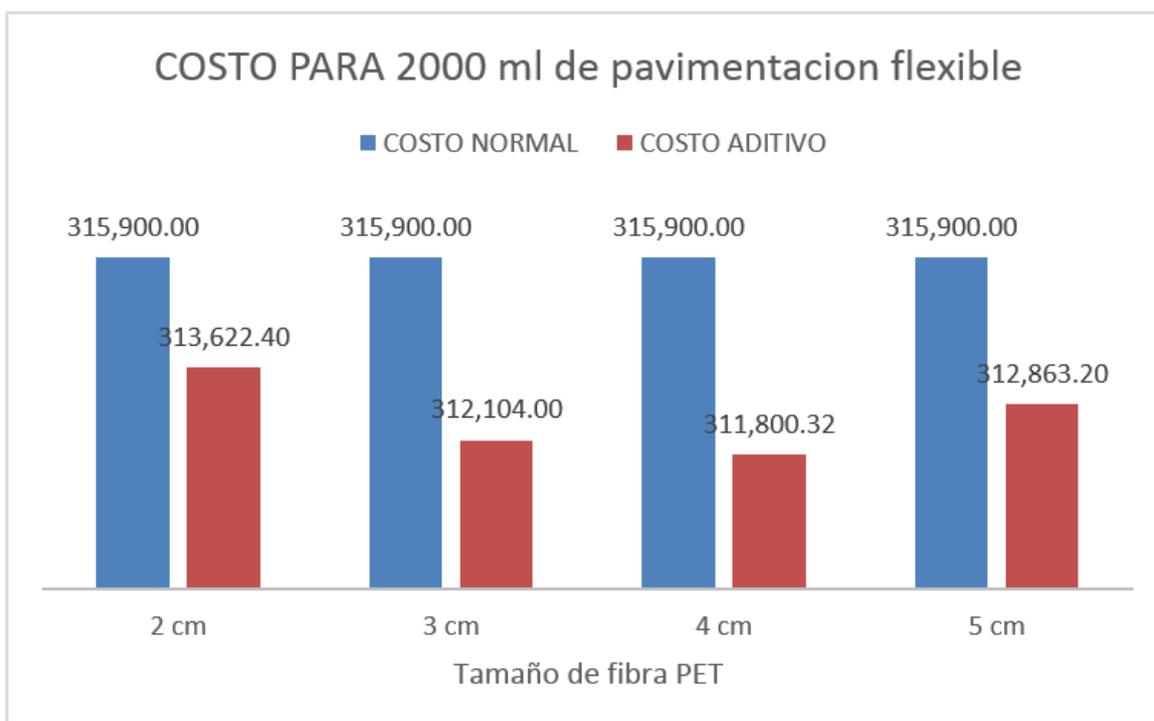


Ilustración 36.

Costo de la losa con base sin aditivo y con él para una longitud de 200 ml y aun ancho de 5.20 m, pavimento rígido.

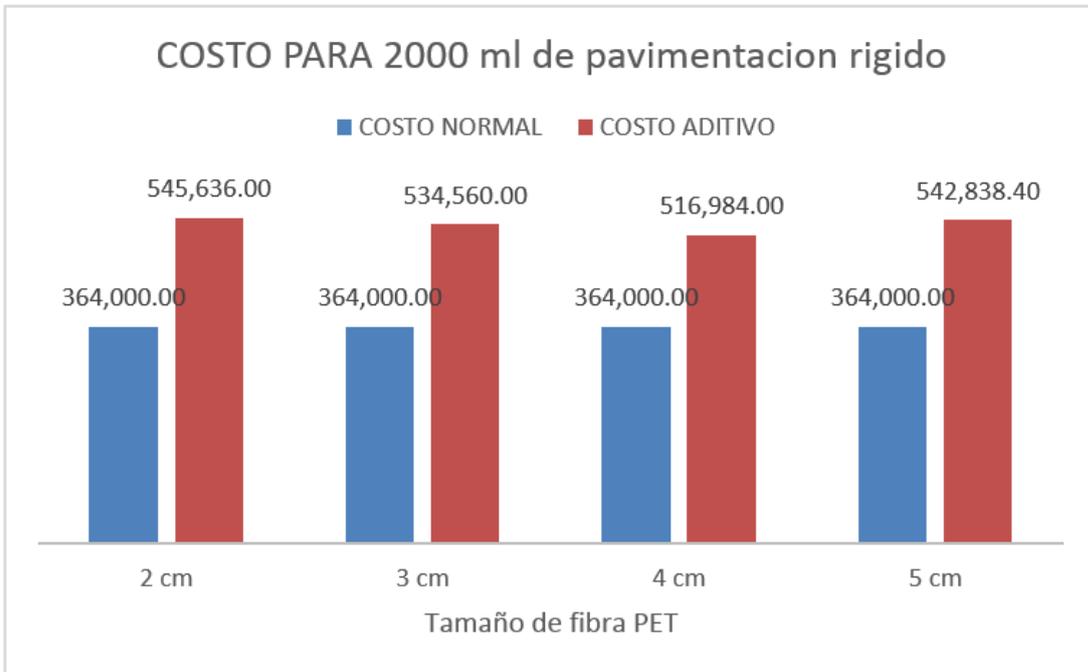


Tabla 30.

Diseño de pavimentos de la primera alternativa, muestra patrón.

DISEÑO DEL PAVIMENTO METODO AASHTO 1993

PROYECTO : Ejemplo **FECHA :**
SECCION 1 : km - km

1. REQUISITOS DEL DISEÑO

a. PERIODO DE DISEÑO (Años)	10
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)	3.34E+05
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)	3.8
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)	2.0
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)	85%
STANDARD NORMAL DEVIATE (Zr)	-1.036
OVERALL STANDARD DEVIATION (So)	0.45

2. PROPIEDADES DE MATERIALES

a. MODULO DE RESILIENCIA DE LA BASE GRANULAR (KIP/IN²)

b. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUB-BASE

c. MODULO DE RESILIENCIA DE LA SUBRASANTE (Mr, ksi) 8.86

3. CALCULO DEL NUMERO ESTRUCTURAL *(Variar SN Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Calculo)*

SN Requerido	G _t	N18 NOMINAL	N18 CALCULO
2.59	-0.17609	5.52	5.52

3. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO

a. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA	
Concreto Asfáltico TRAMIENTO SUPERFICIAL (a1)	0.440
Base granular (a2)	0.132
Subbase (a3)	0.119
b. COEFICIENTES DE DRENAJE DE CAPA	
Base granular (m2)	1.00
Subbase (m3)	1.00

ALTERNATIVA	SNreq	SNresul	D1(cm)	D2(cm)	D3(cm)
1	2.59	2.59	5.044	12.5	22.5
2	2.59	0.00			

Tabla 31.

Diseño de pavimentos de la segunda alternativa, muestra patrón.

DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO			
METODO AASHTO 1993			
PROYECTO :	Ejemplo		FECHA :
SECCION 1 :	km	-	km
1. REQUISITOS DEL DISEÑO			
a. PERIODO DE DISEÑO (Años)			10
b. NUMERO DE EJES EQUIVALENTES TOTAL (W18)			3.34E+05
c. SERVICIABILIDAD INICIAL (pi)			4.0
d. SERVICIABILIDAD FINAL (pt)			2.0
e. FACTOR DE CONFIABILIDAD (R)			85%
STANDARD NORMAL DEVIATE (Zr)			-1.036
OVERALL STANDARD DEVIATION (So)			0.35
2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES			
a. RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CONCRETO f_c (kg/cm ²)			300
RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CONCRETO f_c (psi)			4,258.06
b. MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO E_c (psi)			3,719,465.55
c. MODULO DE ROTURA S'_c (psi)			650.30
d. MODULO DE REACCION DE LA SUBRASANTE- K (pci)			300.00
e. TRANSFERENCIA DE CARGA (J)			2.8
f. COEFICIENTE DE DRENAJE (Cd)			1.0
3. CALCULO DEL ESPESOR DE LOSA (Variar D Requerido hasta que N18 Nominal = N18)			
D (pulg)	G_t	N18 NOMINAL	N18 CALCULO
4.000	-0.17609	5.52	5.52
4. ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO			
A. ESPESOR DE LOSA REQUERIDO (Df), pulgadas			4
B. ESPESOR DE LOSA REQUERIDO (Df), centimetros			10
C. ESPESOR DE SUB BASE (SB), pulgadas			
D. ESPESOR DE SUB BASE (SB), centimetros			0

4.2.6. PROPUESTA PARA COLOCACIÓN DE BASE GRANULAR CON ADICIÓN DE FIBRA DE POLÍMERO RECICLADO EN CAMPO

Esta especificación presenta las disposiciones que son generales a los trabajos sobre pavimentos que están referidos a capas anticontaminantes, subbases y bases granulares con o sin aditivos y que son compatibles con las especificaciones generales para la construcción de carreteras, como una propuesta complementaria y un aporte de la tesis. Sin embargo, no hay antecedentes de su uso en campo. Por lo tanto, deben de ser tomadas como referencia.

a. Preparación de la superficie existente

Esta subrasante deberá cumplir con todos los requisitos exigidos por las especificaciones técnicas para la construcción de carreteras. Esto significa que la subrasante o superficie sobre la cual debe asentarse la capa granular debe tener densidad apropiada y las cotas indicadas en los planos. Además, deberá estar concluida la construcción obras de drenaje necesarios.

b. Distribución y mezcla del material granular con adición de fibra según porcentaje de diseño

- Se deberá acarrear y verter el material granular, de tal modo que no se produzca segregación ni se cause daño o contaminación en la superficie existente. El material granular se dispondrá en unas tongadas (tanda) uniformes, donde será verificada su homogeneidad.
- Se agregará el aditivo de fibra de polímero reciclado, previamente pesado, correspondiente a la cantidad en peso según el volumen de la tongada. Se esparcirá sobre el material granular empleando el procedimiento aceptado, de manera que se esparza la cantidad requerida según la dosificación prevista para el tipo de capa granular a colocar a todo lo ancho de la capa extendida. Durante la aplicación del polímero, la humedad del material no podrá ser superior a la definida como la adecuada para lograr una mezcla íntima y uniforme del agregado con polímero. Sobre el material esparcido solo se permitirá el tránsito del equipo que lo va a mezclar con el material granular.

- En caso que sea necesario humedecer o airear el material para lograr la humedad óptima de compactación, se empleará el equipo adecuado y aprobado, de manera que no perjudique la capa subyacente y deje el material con una humedad uniforme. En caso de que se requiera, se añadirá el agua faltante hasta que el material presente completa homogeneidad.

c. Compactación del material granular con adición de fibra según porcentaje de diseño

- Una vez que el material de la base granular tenga la humedad apropiada se conformará y compactará con el equipo aprobado por el supervisor hasta alcanzar la densidad especificada.
- Aquellas zonas que, por su reducida extensión, su pendiente o su proximidad a otras obras no permitan la utilización del equipo que normalmente se utiliza, se compactarán por los medios adecuados para el caso, en forma tal que las densidades que se alcancen no sean inferiores a las obtenidas en el resto de la capa.
- La compactación se efectuará longitudinalmente, comenzando por los bordes exteriores y avanzando hacia el centro, traslapando en cada recorrido un ancho no menor de un tercio del ancho del rodillo compactador. En las zonas peraltadas, la compactación se hará del borde inferior al superior.
- No se extenderá ninguna capa de material mientras no se haya realizado los controles topográficos y de compactación aprobados por el supervisor en la capa precedente. Tampoco se ejecutará la subbase granular durante precipitaciones pluviales o cuando la temperatura ambiente sea inferior a 6 °C.
- En esta actividad se tomarán los cuidados necesarios para evitar derrames de material que puedan contaminar las fuentes de agua, suelo y flora cercana al lugar de compactación.
- Los materiales excedentes regenerados por esta y las actividades mencionadas anteriormente, deben ser colocados en los depósitos de materiales excedentes.

d. Apertura al tránsito

- Sobre las capas en ejecución se prohibirá la acción de todo tipo de tránsito mientras no se haya completado la compactación. Si ello no es factible, el tránsito que necesariamente deba pasar sobre ellas se distribuirá de forma que no se concentren ahuellamientos sobre la superficie.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La adición de polímeros reciclados es una alternativa a los diferentes métodos ya existentes a la estabilización de capas granulares en pavimentos. Esta permite incrementar en un gran porcentaje el valor de soporte de California de los suelos. Sin embargo, la investigación nos ha indicado que para obtener los mejores resultados se debe de tener en cuenta la forma de la fibra y la dosificación, pues estos dos factores mal dimensionados o determinado podrían darnos resultados adversos a los esperados.
- La investigación nos ha indicado que el tamaño más adecuado y que nos da mayores ventajas son: grosor de 1 a 2 mm y largo de 30 a 40 mm, más grosor y más largos generan problemas de trabajabilidad al realizar los moldes, la fibra no se acomoda bien en el material granular. Ello produce luego efectos negativos que disminuyen el valor de CBR.
- Los mejores resultados se han podido obtener con fibras de 40 mm y una dosificación de 0.50% y 0.75%, con incrementos del CBR de hasta 28% del valor inicial.
- Respecto a los costos, se ha visto que la obtención artesanal de la fibra es muy costosa, llegando a S/ 140.70 por día, para un rendimiento de 0.5 kg/día. Por ello, es necesario que para aplicación en obra se implemente un procedimiento industrial que reduce el costo a S/ 6.02 por kg, para un rendimiento estimado de 50 kg/día. Esto puede variar dependiendo del equipo que se habilite para el proceso.
- Respecto a la evaluación de costo en un tramo de 2,000 millas de pavimentación, ha arrojado resultados positivos en la alternativa de pavimento flexible. Estos cálculos se han hecho con los valores promedio de incremento de CBR por adición de fibra. Sin embargo,

para la alternativa 2 de pavimento rígido, la evaluación de costos es desfavorable. La evaluación se hizo con los costos de obtención industrial con rendimiento 50 kg/día, costo artesanal sale desfavorable para ambas alternativas.

- Respecto al pavimento rígido, el aporte estructural de la base granular es pequeño, pues la rigidez de la losa es considerablemente alta. Sin embargo, se podría evaluar más adelante el efecto de la fibra en el apoyo de la losa que a la larga, podría mejorar el performance de la losa.
- Una forma de mejorar los costos sería reducir el costo de la producción de fibra alrededor de S/ 1.00 el kg. Para ello, se necesitaría una máquina que produzca por lo menos 500 kg por día.
- El uso de polímeros reciclados para la estabilización de suelos granulares constituye una alternativa de uso de materiales que contaminan y que permanecen más de 150 años la degradación natural contaminando el suelo. Este efecto negativo es aprovechado para dar estabilidad de los suelos y aprovechar sus propiedades físicas.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda la implementación de procesos industriales para la obtención de la fibra PET, pues solo así se pueden obtener costos razonables que puedan competir con los métodos convencionales. Máquinas con producciones cercanas a los 500 kg por día.

- Que este método debe de ser probado también en la estabilización de suelos de subrasante para mejorar el comportamiento de los mismos.
- Se debe de estudiar los efectos en el apoyo de la base granular y la losa de concreto en pavimentos rígidos, también como aditivo en el mismo concreto, pues esta fibra tiene resistencia a la tensión podría mejorar la resistencia a la flexo tracción.
- Seguir investigando nuevas aplicaciones de la fibra no solo en pavimentos. También en estabilización de taludes, relleno para obras de arte, terraplenes.
- Se recomienda desarrollar prototipos para el procesamiento industrial de la fibra PET.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España. (2002). *Manual de estabilización de suelos con cal*. Madrid.

Bañón, L. y Beviá García, J. F. (2000). *Manual de carreteras*. Vol. I. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana.

Barrera M., G. (2002). *Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

Boletín 326 (2006). *Manual de estabilización de suelo tratado con cal*. National Lime Association.

Brown, S. F. (1996). *Soil mechanics in pavement engineering*. 46 (3, 383-426.).

Crawford, R.; Webb, H.; Arnott, J. y Ivanova, E. (2013). "Plástico degradation and its environmental implications with special reference". *Polymers*.

Das, Braja (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Quinta edición. Ciudad de México: Interracial Thomson Editores.

Garnica, P.; Pérez, A.; Gómez, J. y Ovil, E. (2002). *Estabilización de suelos con cloruro de sodio para su uso en las vías terrestres*. Documento Técnico 201. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Transporte.

Kraemer, C.; Pardillo, J.; Rocci, S. y Romana, M. (2009). *Ingeniería de carreteras*. Vol. II. Madrid: McGraw-Hill.

López, T.; Hernández, J.; Horta, J.; Coronado, A. y Castaño, V. (2010). *Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas*.

Menéndez Acurio, J. R. (2009). *Ingeniería de pavimentos, materiales, diseño y conservación*.

Menéndez Acurio, J. R. (2013). *Ingeniería de pavimentos: diseño y gestión de pavimentos*. Lima: Imprenta ICG.

Menéndez Acurio, J. R. (2013P). *Ingeniería de pavimentos: materiales y variables de diseño*. Cuarta edición. Lima: Imprenta ICG.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles. (2008a). *Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito*. Lima.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2008b). *Manual de especificaciones técnicas generales para la construcción de pavimentos no pavimentados de bajo volumen de tránsito*. Lima.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2013a). *Manual de pavimentos: mantenimiento o conservación vial*. Lima.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2013b). *Manual de pavimentos: suelos, geología, geotecnia y pavimentos*. Lima.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Dirección General de Caminos y Ferrocarriles (2016). *Manual de ensayo de materiales*. Lima.

Montejo Fonseca, A. (2010). *Ingeniería de pavimentos para pavimentos*. Segunda edición. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Ediciones y Publicaciones.

Ravines Merino (2010). *Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para pavimentos*. Piura.

Rico A. del Castillo, H. (2005). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres pavimentos, ferrocarriles y aeropistas*. Vol. 1. Ciudad de México: Limusa S. A.

Valles Arias, W. (2010). *Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos*.

ANEXOS

ANEXO 1.

Ensayos preliminares de ensayo (EP):

Muestra 1:

1. A.EP.M1.1. Análisis granulométrico mecánico muestra 1
2. A.EP.M1.2. Análisis granulométrico mecánico muestra 2
3. A.EP.M1.3. Análisis granulométrico mecánico muestra 3
4. A.EP.M1.4. Análisis granulométrico mecánico muestra 4
5. A.EP.M1.5. Clasificación de suelos SUCS y AASHTO

Ensayos específicos (EE):

1. A.EE.M1.1. Proctor modificado muestra patrón

Muestra 1:

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.5%: del peso

1. A.EE. A. Ensayo CBR
2. A.EE. B. Ensayo CBR
3. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.75%: del peso

1. A.EE. A. Ensayo CBR
2. A.EE. B. Ensayo CBR
3. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.00%: del peso

1. A.EE. A. Ensayo CBR
2. A.EE. B. Ensayo CBR
3. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.25%: del peso

1. A.EE. A. Ensayo CBR
2. A.EE. B. Ensayo CBR
3. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.50%: del peso

1. A.EE. A. Ensayo CBR

2. A.EE. B. Ensayo CBR
3. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.75%: del peso

1. A.EE. A. Ensayo CBR
2. A.EE. B. Ensayo CBR
3. A.EE. C. Ensayo CBR

Muestra 2:

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.5%: del peso

4. A.EE. A. Ensayo CBR
5. A.EE. B. Ensayo CBR
6. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.75%: del peso

4. A.EE. A. Ensayo CBR
5. A.EE. B. Ensayo CBR
6. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.00%: del peso

4. A.EE. A. Ensayo CBR
5. A.EE. B. Ensayo CBR
6. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.25%: del peso

4. A.EE. A. Ensayo CBR
5. A.EE. B. Ensayo CBR
6. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.50%: del peso

4. A.EE. A. Ensayo CBR
5. A.EE. B. Ensayo CBR
6. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.75%: del peso

4. A.EE. A. Ensayo CBR
5. A.EE. B. Ensayo CBR

6. A.EE. C. Ensayo CBR

Muestra 3:

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.5%: del peso

7. A.EE. A. Ensayo CBR

8. A.EE. B. Ensayo CBR

9. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.75%: del peso

7. A.EE. A. Ensayo CBR

8. A.EE. B. Ensayo CBR

9. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.00%: del peso

7. A.EE. A. Ensayo CBR

8. A.EE. B. Ensayo CBR

9. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.25%: del peso

7. A.EE. A. Ensayo CBR

8. A.EE. B. Ensayo CBR

9. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.50%: del peso

7. A.EE. A. Ensayo CBR

8. A.EE. B. Ensayo CBR

9. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.75%: del peso

7. A.EE. A. Ensayo CBR

8. A.EE. B. Ensayo CBR

9. A.EE. C. Ensayo CBR

Muestra 4:

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.5%: del peso

10. A.EE. A. Ensayo CBR

11. A.EE. B. Ensayo CBR

12. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 0.75%: del peso

10. A.EE. A. Ensayo CBR

11. A.EE. B. Ensayo CBR

12. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.00%: del peso

10. A.EE. A. Ensayo CBR

11. A.EE. B. Ensayo CBR

12. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.25%: del peso

10. A.EE. A. Ensayo CBR

11. A.EE. B. Ensayo CBR

12. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.50%: del peso

10. A.EE. A. Ensayo CBR

11. A.EE. B. Ensayo CBR

12. A.EE. C. Ensayo CBR

Cálculo de CBR asumiendo el polímero al 1.75%: del peso

10. A.EE. A. Ensayo CBR

11. A.EE. B. Ensayo CBR

12. A.EE. C. Ensayo CBR