

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN  
PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO  
PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE”**

**Proyecto de grado presentado para optar al título de Licenciatura en Ingeniería Civil**

**POSTULANTE: MONICA QUEA POMA**

**TUTOR: MSC. ING. CARLOS ALEX ARTEAGA VARGAS**

**LA PAZ – BOLIVIA**

**2024**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar, a mi director de carrera, Ing. Miguel Muñoz Black, por su paciencia, orientación y sabiduría.

Agradezco también a mi tutor M. Sc. Ing. Carlos Alex Arteaga Vargas, por su valioso tiempo, guía y asesoramiento en el desarrollo de mi investigación. Su conocimiento y paciencia fueron cruciales para mi crecimiento académico.

Agradezco a los miembros de mi tribunal MSc. Ing. Oscar Luis Pérez Loayza, Ing. Jhon Antony Moreno Barrenechea, MSc. Ing. Antonio Ruben Marino Suño y al Ing. José Daniel Bustos Quiroga, por el valioso tiempo, dedicación y valiosas observaciones que han sido fundamentales para la mejora y culminación de este proyecto.

De forma personal, agradezco profundamente a Don Rodó, Don Pablo y Doña Lily, quienes desde el inicio de mi carrera me brindaron apoyo moral y guía invaluable.

Agradezco a la Empresa Municipal de Asfalto y Vías (EMAVIAS) por darme la oportunidad de utilizar las instalaciones durante el tiempo de la realización de mi proyecto, al Ing. René García, encargado del Laboratorio de EMAVIAS, a mi tutor institucional Ing. José Riveros por su apoyo y aportaciones que me brindaron para mi proyecto. Agradecer a los técnicos del laboratorio de EMAVIAS, Don Carlos y Don Cristian, por la ayuda brindada, consejos y todos los momentos alegres que compartimos con cada uno de ellos. Agradecer especialmente al Ingeniero Eiver Méndez, por la enseñanza y colaboración brindada.

Agradezco la confianza y el apoyo brindado por parte de mis padres, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me han demostrado su amor, esfuerzo, sacrificio, así enseñándome a no desfallecer ni rendirme ante nada, siempre perseverar y confiar en Dios. A mis compañeros de la universidad con los que compartimos las aulas, por las experiencias vividas. Sin el apoyo y colaboración de cada uno de ustedes, que me ayudaron directa e indirectamente este logro académico que marcará un hito en mi vida profesional.

**MONICA QUEA POMA**

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mi amada madre Benita Poma Limachi por ser mi pilar fundamental en mi vida y demostrarme la gran fe que tiene en mí. A mi padre, Rene Quea Tito quien con sus consejos ha sabido guiarme para culminar mi carrera profesional y su apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones. A mi hermana María Quea Poma por la paciencia que me tuvo durante todo este tiempo. A mis abuelos que descansen en paz.

A Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más.

A todos los amigos, principalmente a mi mejor amigo, por brindarme el apoyo incondicional y afecto, que me alientan a seguir cada día adelante, gracias.

**MONICA QUEA POMA**

**RESUMEN:**

El principal objetivo de este proyecto de investigación es evaluar y comparar los efectos del reciclado de un pavimento flexible con adición de agentes químicos, utilizando dos diferentes enfoques. El primer enfoque es reciclar pavimento flexible solo con cemento y el segundo enfoque es reciclar pavimento flexible con cemento Portland más un aditivo que es el NovoCrete. Buscando cuál de estas técnicas ofrece mejores resultados en términos de resistencia, durabilidad y comportamiento del pavimento reciclado.

Inicialmente, se seleccionó el tramo Cotoca - Cuatro Cañadas para el estudio. Se realizaron ensayos en laboratorio para evaluar propiedades como la resistencia y durabilidad, así pudiendo proceder a realizar las diferentes dosificaciones con el cemento Portland y el aditivo NovoCrete.

La combinación de cemento Portland más NovoCrete mostró los mejores resultados en términos de resistencia, durabilidad y comportamiento del pavimento reciclado, superando tanto a la adición del cemento Portland más el aditivo NovoCrete que con solo el cemento Portland.

Basado en los resultados satisfactorios, se concluye que la técnica de reciclado profundo de pavimento flexible con cemento Portland más NovoCrete es la más efectiva en términos de reciclado, mejorando las propiedades mecánicas como la resistencia y durabilidad, también hablando en aspectos ambientales.

Esta técnica puede ser recomendada para proyectos de reciclado de pavimentos donde se busca mejorar la resistencia, prolongar la vida útil del pavimento de manera significativa, reducción de costos de mantenimiento, tiempo de construcción, maquinaria, reducción del personal, prefisuración y reemplazo de la capa de rodadura convencional por un MicroPavimento.

**ABSTRACT**

The main objective of this research project is to evaluate and compare the effects of recycling a flexible pavement with the addition of chemical agents, using two different approaches. The first approach is to recycle flexible pavement with only cement and the second approach is to recycle flexible pavement with Portland cement plus an additive which is NovoCrete. Looking for which of these techniques offers the best results in terms of resistance, durability and behavior of the recycled pavement.

Initially, the Cotoca - Cuatro Cañadas section was selected for the study. Laboratory tests were carried out to evaluate properties such as resistance and durability, thus being able to proceed with different dosages with Portland cement and the NovoCrete additive.

The combination of Portland cement plus NovoCrete showed the best results in terms of resistance, durability and behavior of the recycled pavement, surpassing both the addition of Portland cement plus the NovoCrete additive and with Portland cement alone.

Based on the satisfactory results, it is concluded that the deep recycling technique of flexible pavement with Portland cement plus NovoCrete is the most effective in terms of recycling, improving mechanical properties such as resistance and durability, also speaking in environmental aspects.

This technique can be recommended for recycled pavement projects where the aim is to improve resistance, significantly extend the useful life of the pavement, reduce maintenance costs, construction time, machinery, personnel reduction, pre-cracking and replacement of the layer. conventional rolling by a MicroPavimento.

## Índice General

<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	1
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN GENERAL .....	4
1.5. OBJETIVOS .....	4
1.5.1. Objetivo general .....	4
1.5.2. Objetivo específico.....	5
1.6. ALCANCE Y LIMITACIONES .....	5
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>6</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1. Pavimentos para carreteras .....	6
2.1.1. Pavimento flexible.....	6
2.1.2. Pavimento rígido .....	8
2.1.3. Componentes del Pavimento .....	9
2.1.3.1. Superficie .....	9
2.1.3.2. Estructura de Pavimento.....	9
2.1.3.3. Subrasante .....	10
2.1.4. El ciclo de deterioro de los caminos .....	10
2.1.4.1. FASE A - CONSTRUCCIÓN .....	10
2.1.4.2. FASE B - DETERIORO LENTO Y POCO VISIBLE. ....	11
2.1.4.3. FASE C - DETERIORO ACELERADO Y QUIEBRE.....	11
2.1.4.4. FASE D – PÉRDIDA TOTAL .....	12
2.1.5. Factores que Causan el Deterioro del Pavimento .....	12
2.1.6. Auscultación de pavimento .....	13
2.1.6.1. Auscultación funcional.....	14
2.1.6.2. Auscultación estructural .....	14
2.1.7. Operación de Rehabilitación .....	14
2.1.7.1. Rehabilitación Superficial .....	14
2.1.7.2. Rehabilitación Estructural .....	15

2.2.	Reciclaje de Pavimentos.....	15
2.2.1.	Propósitos del reciclaje.....	16
2.2.2.	Tipos de Reciclado.....	17
2.3.	Aplicaciones de reciclado.....	18
2.3.1.	Reciclado Superficial.....	18
2.3.2.	Reciclado Profundo.....	18
2.4.	Equipo para la realización de obras de reciclado.....	19
2.4.1.	Descripción de los principales equipos para un reciclado profundo.....	23
2.4.1.1.	Distribuidores de conglomerante.....	23
2.4.1.2.	Recicladoras.....	24
2.4.1.3.	Rodillos.....	25
2.5.	Ejecución, de las obras en un reciclado profundo.....	26
2.5.1.	Preparación de la superficie existente.....	27
2.5.2.	Extensión del conglomerante.....	28
2.5.3.	Escarificado y mezclado.....	29
2.5.4.	Humectación.....	30
2.5.5.	Prefisuración (realización de juntas en frío) o fisuración controlada.....	30
2.5.6.	Compactación.....	31
2.5.7.	Refino y nivelación.....	32
2.5.8.	Extensión del riego de curado o de protección.....	33
2.6.	Agentes estabilizadores.....	34
2.6.1.	Cemento Portland.....	34
2.6.1.1.	Tipos y clases de Cemento Comerciales en Bolivia.....	34
2.6.1.2.	Propiedades del cemento.....	35
2.6.2.	HITEC-NovoCrete.....	36
2.6.2.1.	Ventajas de HITEC-NovoCrete.....	40
2.6.2.2.	Consideraciones para ensayos de laboratorio.....	41
2.6.2.3.	Factores que influyen en el estudio de costos.....	41
2.6.2.4.	Proyectos de HITEC-NovoCrete.....	42
2.7.	Especificaciones técnicas Invias (Instituto Nacional de Vial-Colombia).....	43
2.7.1.	Materiales.....	43
2.7.2.	Equipo.....	45
2.7.3.	Fórmula de trabajo.....	45



2.8.	Especificaciones técnicas ABC (Administradora Boliviana de Carreteras).....	46
2.8.1.	Revestimiento bituminoso .....	46
2.8.2.	El espesor de la capa bituminosa.....	46
2.8.3.	DOSIFICACIÓN DEL SUELO – CEMENTO .....	46
2.8.4.	Norma General de Dosificación .....	47
2.8.5.	Norma Simplificada de Dosificación.....	51
	<b>CAPITULO III.....</b>	<b>52</b>
<b>3.</b>	<b>MARCO PRÁCTICO.....</b>	<b>52</b>
3.1.	Metodología .....	52
3.1.1.	Muestreo y transporte del material .....	52
3.1.2.	Ensayos de laboratorio (procedimientos realizados) – Características Física-Mecánica de Suelo Reciclado	54
3.1.2.1.	Contenido de humedad.....	55
3.1.2.2.	Análisis granulométrico por tamizado .....	55
3.1.2.3.	Límites de Atterberg.....	56
3.1.2.4.	Límite de contracción (método de la parafina) .....	57
3.1.2.5.	Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición	58
3.1.2.6.	Equivalente de arena .....	58
3.1.2.7.	Gravedad específica de las partículas sólidas .....	59
3.1.2.8.	Peso específico de agregado grueso.....	60
3.1.2.9.	Relación soporte california CBR.....	61
3.1.2.10.	Relación Humedad-Densidad de mezclas compactadas .....	62
3.1.2.11.	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados .....	64
3.1.2.12.	Ensayo de durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas) .....	67
	<b>CALCULO IV.....</b>	<b>70</b>
<b>4.</b>	<b>CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
4.1.	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE SUELO RECICLADO.....	70
4.1.1.	Análisis granulométrico por tamizado.....	70
4.1.2.	Límites de consistencia del suelo (límites de Atterberg) .....	73
4.1.3.	Límite de contracción (método de la parafina) .....	73
4.1.4.	Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de perdida por ignición	74

4.1.5.	Equivalente de arena .....	74
4.1.6.	Gravedad específica de las partículas sólidas .....	75
4.1.7.	Peso específico de agregado grueso .....	76
4.1.8.	Clasificación del tipo de suelos .....	76
4.1.9.	Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento .....	78
4.1.10.	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento .....	79
4.1.11.	Relación California (CBR) .....	80
4.1.12.	RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS CON SUELO RECICLADO	82
4.2.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO PORTLAND .....	84
4.2.1.	Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento .....	84
4.2.2.	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento .....	87
4.2.3.	Ensayo de durabilidad humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento .....	89
4.2.4.	RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS CON SUELO RECICLADO MÁS CEMENTO PORTLAND .....	91
4.3.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO Y ADICIÓN DEL NOVOCRETE .....	94
4.3.1.	Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento .....	94
4.3.2.	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento .....	97
4.3.3.	Ensayo de durabilidad (humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento .....	99
4.3.4.	RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS CON SUELO RECICLADO MÁS CEMENTO PORTLAND MÁS ADITIVO .....	101
4.4.	FLUJOGRAMA DE RESULTADOS .....	104
4.5.	ESTIMACIÓN DE CANTIDADES DE LOS AGENTES QUÍMICOS (Cemento Portland y NovoCrete)	106
4.5.1.	Material Reciclado con Cemento .....	106
4.5.2.	Material Reciclado con la Combinación de Cemento y NovoCrete .....	107
<b>CAPITULO V .....</b>		<b>108</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>108</b>
5.1.	CONCLUSIONES .....	108
5.2.	RECOMENDACIONES .....	114
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>115</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>

<b>CAPÍTULO VII .....</b>	<b>117</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>117</b>
7.1. Ensayos de Caracterización para el Suelo Reciclado.....	117
7.1.1. Contenido de Humedad.....	117
7.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado.....	118
7.1.3. Límites de Consistencia del Suelo (Límites de Atterberg).....	121
7.1.4. Límite de Contracción (método de la parafina).....	124
7.1.5. Equivalente de Arena.....	125
7.1.6. Gravedad Específica de las Partículas Sólidas.....	128
7.1.7. Peso Específico de Agregado Grueso.....	130
7.1.8. Clasificación del Tipo de Suelos.....	131
7.1.9. Relaciones Humedad-Densidad de mezclas compactadas de Suelo-Cemento.....	133
7.1.10. Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento)	136
7.1.11. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento.....	139
7.1.12. Relación Soporte California (CBR).....	141
7.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE SUELO RECICLADO.....	144
ANEXO 1. Análisis Granulométrico de Suelo por Tamizado.....	144
ANEXO 2. Límites de Contracción.....	146
ANEXO 3. Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición	147
ANEXO 4. Equivalente de arena.....	148
ANEXO 5. Gravedad específica de las partículas sólidas.....	149
ANEXO 6. Peso específico de agregado grueso.....	150
ANEXO 7. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento.....	151
ANEXO 8. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento.....	152
ANEXO 9. Relación california (CBR).....	153
7.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO	155
ANEXO 10. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento...	155
ANEXO 11. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento.....	161
ANEXO 12. Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo- Cemento)	165

7.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO Y ADICIÓN .....	167
ANEXO 13. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento...	167
ANEXO 14. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento .....	172
ANEXO 15. Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento)	176

## Índice de Tabla

<b>Tabla 1:</b> Longitudes de los tramos a rehabilitar .....	2
<b>Tabla 2:</b> Equipo para la realización de las distintas operaciones de reciclado de una carretera .....	21
<b>Tabla 3:</b> Clasificación de los rodillos lisos vibratorios.....	26
<b>Tabla 4:</b> Tipos de cemento comerciales en Bolivia .....	35
<b>Tabla 5:</b> Estabilización con Cemento Vs Estabilización con Cemento más el aditivo NovoCrete .....	37
<b>Tabla 6:</b> Cantidad a añadir el aditivo respecto al cemento .....	39
<b>Tabla 7:</b> Requerimientos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento .....	43
<b>Tabla 8:</b> Requerimientos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento .....	43
<b>Tabla 9:</b> Requerimientos del material para la construcción de suelo-cemento.....	44
<b>Tabla 10:</b> Criterios de durabilidad para mezclas suelo cemento.....	44
<b>Tabla 11:</b> Criterios de resistencia para mezclas suelo cemento.....	44
<b>Tabla 12:</b> Espesores del revestimiento bituminoso.....	46
<b>Tabla 13:</b> Cantidades de cemento por tipo de suelo de acuerdo a la clasificación de la AASHTO .....	48
<b>Tabla 14:</b> Análisis Granulométrico de Suelo Reciclado del agregado grueso.....	70
<b>Tabla 15:</b> Análisis Granulométrico de Suelo Reciclado del agregado fino .....	70
<b>Tabla 16:</b> Distribución granulométrica de partículas.....	71
<b>Tabla 17:</b> Porcentaje de partículas .....	72
<b>Tabla 18:</b> Distribución del Límite Superior e Inferior.....	72
<b>Tabla 19:</b> Límites de consistencia .....	73
<b>Tabla 20:</b> Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura .....	73
<b>Tabla 21:</b> Volúmenes para Cálculo de Límite de Contracción .....	73
<b>Tabla 22:</b> Resultado de Límite de Contracción .....	73
<b>Tabla 23:</b> Contenido de material Orgánica .....	74
<b>Tabla 24:</b> Ensayo de Equivalente de Arena.....	74
<b>Tabla 25:</b> Gravedad Específica de las Partículas Sólidas.....	75
<b>Tabla 26:</b> Peso Específico de Agregado Grueso .....	76
<b>Tabla 27:</b> Absorción del Agregado Grueso .....	76
<b>Tabla 28:</b> Características para la Clasificación del Suelo .....	77
<b>Tabla 29:</b> Resultados de la Clasificación S.U.C.S. ....	78
<b>Tabla 30:</b> Resultados de la Clasificación A.A.S.H.T.O.....	78
<b>Tabla 31:</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del Suelo Reciclado .....	79
<b>Tabla 32:</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del Suelo Reciclado.....	79
<b>Tabla 33:</b> Compactación de la muestra .....	80

<b>Tabla 34.</b> Humedades de compactación.....	80
<b>Tabla 35.</b> CBR - Factor de Deformación de la Anilla .....	80
<b>Tabla 36.</b> Valores de CBR al 100% Y 95% de suelo reciclado.....	80
<b>Tabla 37.</b> Comparación INV E 350-13 y Resultados obtenidos Suelo Reciclado .....	82
<b>Tabla 38.</b> Resultados de las propiedades físicas del suelo reciclado.....	82
<b>Tabla 39.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del Suelo Reciclado.....	82
<b>Tabla 40.</b> Resultados de CBR.....	83
<b>Tabla 41.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 1%CP) .....	84
<b>Tabla 42.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 1%CP).....	84
<b>Tabla 43.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 2%CP) .....	85
<b>Tabla 44.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 2%CP).....	85
<b>Tabla 45.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 3,5%CP) .....	85
<b>Tabla 46.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 3,5%CP).....	85
<b>Tabla 47.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 4%CP) .....	86
<b>Tabla 48.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 4%CP).....	86
<b>Tabla 49.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 6%CP) .....	86
<b>Tabla 50.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 6%CP).....	87
<b>Tabla 51.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 8%CP) .....	87
<b>Tabla 52.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 8%CP).....	87
<b>Tabla 53.</b> Rotura de Cilindros de SR + 2%CP .....	88
<b>Tabla 54.</b> Rotura de Cilindros de SR + 4%CP .....	88
<b>Tabla 55.</b> Rotura de Cilindros de SR + 6%CP .....	88
<b>Tabla 56.</b> Rotura de Cilindros de SR + 8%CP .....	89
<b>Tabla 57.</b> Perdida de Suelo Cemento (SR + %Óptimo CP) .....	89
<b>Tabla 58.</b> Cambio de Volumen de Suelo Cemento (SR + %Óptimo CP).....	90
<b>Tabla 59.</b> Densidad Máxima y Humedad Óptima a diferentes porcentajes de cemento .....	91
<b>Tabla 60.</b> R Vs CC.....	92
<b>Tabla 61.</b> Resultados de Durabilidad .....	93
<b>Tabla 62.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del .....	94
<b>Tabla 63.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 1%CP + 2%NC * 1%CP) .....	94
<b>Tabla 64.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del .....	95
<b>Tabla 65.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 2%CP + 2%NC * 2%CP) .....	95
<b>Tabla 66.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del .....	95
<b>Tabla 67.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 4%CP + 2%NC * 4%CP) .....	95
<b>Tabla 68.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del .....	96

<b>Tabla 69.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 6%CP + 2%NC * 6%CP) .....	96
<b>Tabla 70.</b> Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del .....	96
<b>Tabla 71.</b> Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 8%CP + 2%NC*8%CP) .....	97
<b>Tabla 72.</b> Rotura de Cilindros de SR + 2%CP + 2%NC*2%CP .....	97
<b>Tabla 73.</b> Rotura de Cilindros de SR + 4%CP + 2%NC*4%CP .....	98
<b>Tabla 74.</b> Rotura de Cilindros de SR + 6%CP + 2%NC*6%CP .....	98
<b>Tabla 75.</b> Rotura de Cilindros de SR + 8%CP + 2%NC*8%CP .....	98
<b>Tabla 76.</b> Perdida de Suelo cemento (SR+%ÓptimoCP+2%NC*%Óptimo CP).....	99
<b>Tabla 77.</b> Cambio de Volumen de Suelo cemento (SR+%ÓptimoCP+2%NC*%Óptimo CP) .....	99
<b>Tabla 78.</b> Densidad Máxima y Humedad Óptima a diferentes porcentajes de cemento más el aditivo .....	101
<b>Tabla 79.</b> Resistencia Vs Contenido de Cemento más NovoCrete .....	102
<b>Tabla 80.</b> Resultados de Durabilidad .....	103
<b>Tabla 81.</b> Requisitos sobre la masa mínima de los especímenes de ensayo.....	118
<b>Tabla 82.</b> Peso de la muestra requerida según el tamaño máximo de partículas .....	119
<b>Tabla 83.</b> Masas de muestras recomendadas .....	129
<b>Tabla 84.</b> La masa mínima de la muestra para ensayo son las siguientes. ....	131
<b>Tabla 85.</b> Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación .....	134
<b>Tabla 86.</b> Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación .....	134
<b>Tabla 87.</b> Contenido de cemento aproximado según la granulometría.....	134
<b>Tabla 88.</b> Valores promedio de agua retenida .....	137
<b>Tabla 89.</b> En el cual se proporcionarán dos procedimientos alternativos .....	139
<b>Tabla 90.</b> Capacidad mínima de carga .....	141
<b>Tabla 91.</b> Valores referenciales de CBR para diferentes suelos .....	142

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Ubicación del tramo carretero _____	2
<b>Figura 2.</b> Estructural de un Pavimento Flexible _____	7
<b>Figura 3.</b> Distribución de cargas en un pavimento flexible _____	7
<b>Figura 4.</b> Pavimento Flexible _____	7
<b>Figura 5.</b> Estructural de un Pavimento Rígido _____	8
<b>Figura 6.</b> Distribución de cargas en un pavimento flexible _____	8
<b>Figura 7.</b> Pavimento rígido _____	9
<b>Figura 8.</b> Transferencia de carga a través de la estructura del pavimento _____	9
<b>Figura 9:</b> Curva de deterioro típica para una carretera pavimentada _____	10
<b>Figura 10.</b> Indicadores de deterioro de pavimentos _____	12
<b>Figura: 11:</b> Reciclaje profundo a 300 mm con diferentes espesores de capa asfáltica _____	19
<b>Figura 12.</b> Tipos de técnica utilizada _____	20
<b>Figura 13.</b> Procedimiento de vía seca - Cemento en polvo _____	20
<b>Figura 14.</b> Procedimiento de vía húmeda - Cemento como lechada _____	20
<b>Figura 15.</b> Maquinaria básica _____	22
<b>Figura 16.</b> Distribución del cemento _____	23
<b>Figura 17.</b> Distribución en forma de lechada _____	24
<b>Figura 18.</b> Máquinas recicladoras de diferentes marcas _____	24
<b>Figura 19.</b> Recicladora Wirtgen WR 2500 S en frío y estabilizadora de suelos _____	25
<b>Figura 20.</b> Compactado con rodillo liso _____	26
<b>Figura 21.</b> Ejecución de las obras para un reciclado profundo _____	27
<b>Figura 22.</b> Área delimitada para el reciclado _____	28
<b>Figura 23.</b> Preparación de la superficie existente antes del reciclado _____	28
<b>Figura 24.</b> Extensión de cemento en forma seca y húmeda _____	29
<b>Figura 25.</b> Esquema del avance del rotor de la recicladora _____	29
<b>Figura 26.</b> Trabajo de reciclado por carril _____	29
<b>Figura 27.</b> Prefisuración de juntas tras terminar el reciclado _____	30
<b>Figura 28.</b> Proceso de una de las alternativas de prefisuración _____	31
<b>Figura 29.</b> Compactación de un tramo _____	31
<b>Figura 30.</b> Refino y nivelación con motoniveladora _____	33
<b>Figura 31.</b> Curado con agua y lanzade emulsión de una pequeña superficie _____	34
<b>Figura 32:</b> Preparación de la superficie para la utilización del aditivo _____	39
<b>Figura: 33:</b> Ventajas de HITEC-NovoCrete _____	40



<b>Figura 34.</b> Principales factores para la realización de un reciclado profundo _____	41
<b>Figura 35:</b> Tecnología avanzada – Construyendo el Futuro HITEC-NovoCrete _____	42
<b>Figura 36.</b> Ubicación de muestra de material COTOCA – CUATRO CAÑADAS _____	52
<b>Figura 37.</b> Despacho de material triturado hacia Cotoca _____	53
<b>Figura 38.</b> Sacos de material para el traslado a EMAVIAS _____	53
<b>Figura 39.</b> Aditivo NovoCrete _____	54
<b>Figura 40.</b> Cemento Portland IP-40 _____	54
<b>Figura 41.</b> Contenido de Humedad _____	55
<b>Figura 42.</b> Análisis Granulométrico _____	55
<b>Figura 43.</b> Límites de Atterberg _____	56
<b>Figura 44.</b> Límites de contracción y preparación de la muestra _____	57
<b>Figura 45.</b> Límites de contracción y preparación con parafina _____	57
<b>Figura 46.</b> Determinación del contenido orgánico _____	58
<b>Figura 47.</b> Equivalente Arena, preparación de la muestra _____	58
<b>Figura 48.</b> Lectura del Equivalente Arena _____	59
<b>Figura 49.</b> Calibración del Picnómetro y preparación de la muestra _____	59
<b>Figura 50.</b> Gravedad Especifica _____	60
<b>Figura 51.</b> Peso Específico de Agregado grueso _____	60
<b>Figura 52.</b> Preparación de la muestra para el ensayo del C.B.R. _____	61
<b>Figura 53.</b> Lectura del Ensayo de C.B.R. _____	61
<b>Figura 54.</b> Preparación de la Muestra para el ensayo de Relación Humedad Densidad _____	62
<b>Figura 55.</b> Moldeo y Pesaje de los moldes _____	62
<b>Figura 56.</b> Determinación del Contenido de Humedad de la muestra _____	63
<b>Figura 57.</b> Ensayo Relación Humedad–Densidad (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland) _____	63
<b>Figura 58.</b> Ensayo Relación Humedad–Densidad (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y aditivo NovoCrete) _____	64
<b>Figura 59.</b> Preparación de muestra para la realización de cilindros _____	64
<b>Figura 60.</b> Curado de cilindros para la posterior rotura _____	65
<b>Figura 61.</b> Curado de cilindros para la rotura (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland) _____	65
<b>Figura 62.</b> Rotura de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland) _____	66
<b>Figura 63.</b> Curado de cilindros para la rotura (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y aditivo NovoCrete) _____	66
<b>Figura 64.</b> Rotura de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y aditivo NovoCrete) _____	67
<b>Figura 65.</b> Preparación de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland) _____	67
<b>Figura 66.</b> Curado y Secado de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland) _____	68

<b>Figura 67.</b> Cepillado de Cilindros para el Ensayo de Durabilidad (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland) _____	68
<b>Figura 68.</b> Curado y Secado de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y NovoCrete) _____	69
<b>Figura 69.</b> Sistema de Clasificación de Suelo _____	77
<b>Figura 70.</b> Clasificación de Suelo Método unificado _____	78
<b>Figura 71.</b> Colocación de la muestra en el aparato de Casagrande _____	123
<b>Figura 72.</b> Corte con el ranurador _____	123
<b>Figura 73.</b> Amasado de la muestra _____	124
<b>Figura 74.</b> Muestra que se deberá meter al contenedor _____	124
<b>Figura 75.</b> Lectura en el cilindro _____	127
<b>Figura 76:</b> Sistema unificado de clasificación de suelos (AASHTO) _____	132
<b>Figura 77.</b> Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.) _____	133

## Índice de Gráficos

<b>Gráfico 1.</b> Curva Granulométrica Suelo Reciclado _____	71
<b>Gráfico 2.</b> Curva Granulométrica con los Límites Superior e Inferior _____	72
<b>Gráfico 3.</b> Curva de CBR _____	81
<b>Gráfico 4.</b> Relación Peso Unitario CBR _____	81
<b>Gráfico 5.</b> Curva de Compactación Suelo Reciclado _____	83
<b>Gráfico 6.</b> Curva Proctor con diferentes Contenidos de Cemento _____	91
<b>Gráfico 7.</b> Círculos de Mohr y Envolvente de Falla _____	92
<b>Gráfico 8.</b> Resistencia a la compresión Vs Contenido de Cemento _____	92
<b>Gráfico 9.</b> Cambio de Volumen Vs Numero de Ciclos SR + 6,10% Óptimo CP _____	93
<b>Gráfico 10.</b> Curva de Compactación _____	101
<b>Gráfico 11.</b> Círculos de Mohr y Envolvente de Falla _____	102
<b>Gráfico 12.</b> Resistencia a la compresión Vs Contenido de Cemento más NovoCrete _____	102
<b>Gráfico 13.</b> Peso Vs Numero de Ciclos (SR+5,0ÓptimoCP+2%NC*5,0Óptimo CP) _____	103



LA PAZ 03 DE MAYO 2024

**Señores:**

Universidad Mayor de San Andrés "UMSA"  
Carrera de ingeniería civil

**Presente:**

## **CERTIFICACION Y RESPALDO DE ENSAYOS** **REALIZADOS EN LOS LABORATORIOS DE** **(EMAVIAS)**

**CERTIFICA:**

Que la universitaria Monica Quea Poma con cedula de identidad N° 9171095 LP., ha concluido con los ensayos realizados en los ambientes de laboratorio de la Empresa Municipal de Asfaltos y Vías (EMAVIAS), para el proyecto de grado "ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE", los trabajos han sido desarrollados de acuerdo a lo indicado en normativas.

Es cuanto se certifica el desarrollo de los trabajos de ensayos en laboratorio, para fines de conclusión de presente proyecto de grado.



*Ing. José Riveros G.*  
TÉCNICO ESPECIALISTA EN SUELOS  
EMAVIAS

*Ing. René Alfredo García Vald.*  
GERENTE TÉCNICO S.A.F.  
EMAVIAS

*Carlos P. Posari C.*

*Gustav Rodríguez*

## **CAPITULO I**

### **1. ASPECTOS GENERALES**

#### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El reciclado de pavimento es una práctica cada vez más común en la ingeniería de carreteras, que busca no solo rehabilitar la infraestructura vial existente, sino también mejorar la sostenibilidad ambiental y económica. En este contexto, el reciclado profundo de pavimento flexible ha surgido como una técnica prometedora para prolongar la vida útil de las carreteras mediante la reutilización de materiales existentes y la mejora de sus propiedades mecánicas.

En la presente investigación, se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades mecánicas de la muestra reciclada con las diferentes dosificaciones de cemento Portland.

Al mezclar cemento con agua (tierra, posibles aditivos, etc.), se producen reacciones químicas de los componentes del cemento. El llamado "proceso de hidratación". Al agregar el aditivo (HITEC-NovoCrete), optimiza aún más este proceso. Se mejora la formación y el desarrollo de la estructura cristalina, se forman más agujas de cristal, más largas y más flexibles, lo que da como resultado una estructura muy homogénea y compacta de la construcción respectiva.

#### **1.2. ANTECEDENTES**

Como se ve en la actualidad, existen países más desarrollados que el nuestro en reciclado de pavimento flexible, desde las máquinas fresadoras modificadas y estabilizadoras de suelos hasta las recicladoras especializadas actuales. Debido a que estas últimas están especialmente diseñadas para reciclar en una sola pasada y capas de pavimento de gran espesor, las máquinas modernas tienden a ser grandes y potentes, motivo por el cual las experiencias con relación al tema de reciclado de pavimento flexible se han incrementado.

El mantenimiento y la rehabilitación de la infraestructura vial son aspectos críticos para garantizar la seguridad y la eficiencia del transporte terrestre. El reciclado profundo de pavimento flexible implica la reutilización de los materiales existentes en la construcción, ofreciendo un beneficio significativo en reducción de costos.

El proyecto, donde fue realizado el muestreo, contempla la rehabilitación, mantenimiento periódico y rutinario de esta vía, cuya longitud total es de 563,6 kilómetros.

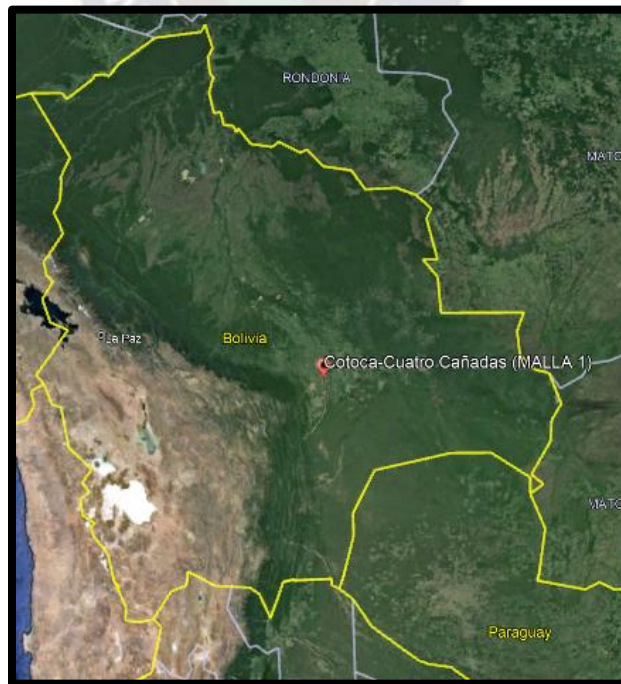
Está dividido en cinco mallas o tramos, los primeros cuatro se encuentran a cargo de la ABC regional Santa Cruz.

**Tabla 1:** Longitudes de los tramos a rehabilitar

MALLAS	Departamento	Longitud (km)
Cotoca-Cuatro Cañadas (Malla 1).	Santa-Cruz	74,76
Cuatro Cañadas-Núcleo II (Malla 2)	Santa-Cruz	61,15
Núcleo II-Yotaú (Malla 3)	Santa-Cruz	105,40
Yotaú-Nueva Cotoca (Malla 4)	Santa-Cruz	182,71
Nueva Cotoca-Trinidad-San Javier-Trinidad-Puerto Varador (Malla 5)	Santa-Cruz	139,58

**Fuente:** Elaboración propia

El presente estudio se enmarca dentro de este contexto y tienen como objetivo comparar las alternativas propuesta con cemento Portland y la combinación de cemento Portland con el aditivo no convencional NovoCrete, para el reciclado profundo de pavimento flexible se tomó en cuenta el proyecto vía Cotoca-Cuatro Cañadas (malla 1) teniendo una longitud de 74,76 km Santa Cruz, con las dosificaciones óptimas, teniendo como objetivo principal mejorar las propiedades mecánicas y estructurales del pavimento reciclado.



**Figura 1.** Ubicación del tramo carretero

**Fuente:** Google Earth Pro

### 1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con esta investigación, se pretende analizar el reciclado de pavimento flexible entre el cemento Portland y el cemento Portland más un aditivo no convencional (NovoCrete), el cual consiste en recuperar una parte del pavimento flexible deteriorado, cuya dosificación se debe realizar mediante ensayos de laboratorios, que dependen de la calidad del material a reciclar y la cantidad de aditivo a aplicar.

Así, pudiendo determinar las características físico-mecánicas del reciclado profundo en pavimentos flexibles, con la finalidad de proporcionar al profesional el procedimiento adecuado acerca de este tipo de reutilización del pavimento flexible con un aditivo no convencional, para que este pueda plantear alternativas y soluciones al tema de carreteras en rehabilitación y contribuir así a nuestro país con el aumento de proyecto de esta naturaleza.

Esta recuperación consiste, en el triturado de la capa de rodadura en su totalidad más una determinada profundidad de la capa base, así obteniendo un material triturado, en el primer enfoque se mezclará solo con cemento Portland y agua en proporciones adecuadas, obteniéndose un material reciclado, por otra parte, también se realizará un segundo enfoque, el mismo material triturado se mezclará con cemento Portland más aditivo NovoCrete y agua en proporciones adecuadas, como resultado final de los dos enfoques con el compactado y nivelado así pueda ser utilizado como una nueva capa en reparación.

El reciclado de pavimentos consiste principalmente en la reutilización parcial de los materiales que lo componen, con el fin de construir una nueva estructura homogénea de una cierta profundidad especificada por los respectivos diseños, la cual sea capaz de soportar las solicitaciones de tráfico que por allí pasan. A estos materiales suelen agregarse aditivos, rejuvenecedores, estabilizantes o conglomerantes con una dosificación obtenida mediante ensayos de laboratorio o in-situ, los cuales cumplen con distintas funciones dependiendo de las solicitaciones de la vía.

Una de las ventajas de la técnica de reciclaje desde el punto de vista de la protección ambiental y ecológica es bien conocida, debido a una menor necesidad de extraer materiales granulares en canteras.

De hecho, en general, en el país existe escasez de materiales granulares de calidad adecuada para su uso, lo que obliga a utilizar materiales alejados del lugar de la obra.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN GENERAL

Normalmente, el deterioro de los pavimentos es una realidad nacional irrefutable, ya que una carretera está sujeta a la acción del tráfico, clima, entre otros, y así conllevar una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de rehabilitación.

Asimismo, con el paso del tiempo, muchas de estas carreteras han alcanzado una edad próxima de su vida útil, requiriendo, por tanto, su mantenimiento o rehabilitación, que dependiendo del grado de deterioro puede ser costosa. Por lo que, una gran cantidad de recursos públicos son destinados al mantenimiento de estas carreteras.

Por ello, se propone una rápida y urgente intervención para poner fin a un problema que existe debido a la demanda de carreteras pavimentadas en el país por el tráfico circundante.

El reciclado profundo en pavimentos flexibles con cemento Portland y el uso del aditivo NovoCrete representa un enfoque innovador y prometedor en el campo de la ingeniería de carreteras donde este proyecto permitirá ver la reducción del consumo de nuevos materiales y la disminución de residuos de construcción los cuales contribuirán a la sostenibilidad ambiental y al enfoque de desarrollo sostenible.

La incorporación de cemento Portland y el aditivo NovoCrete en el reciclado profundo puede mejorar las propiedades mecánicas del pavimento, como la resistencia y la durabilidad. Esto puede resultar en una mayor capacidad para soportar cargas de tráfico, minimizar la formación de grietas y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo. Su ejecución puede tener un impacto positivo tanto en la industria de la construcción de carreteras como en la protección del medio ambiente.

## 1.5. OBJETIVOS

### 1.5.1. Objetivo general

Analizar y comparar las características físico-mecánicas del reciclado profundo de un pavimento flexible de espesor de 20 cm. (capa de rodadura más una determinada profundidad de la capa base), siendo el primer enfoque solo cemento Portland y el segundo enfoque cemento Portland más un aditivo no convencional (NovoCrete), determinar el contenido óptimo de cemento Portland en el primer enfoque y cemento portland y aditivo NovoCrete en el segundo enfoque, a fin de mejorar el comportamiento físico-mecánico para la conformación de una capa base reciclada en el tramo Cotoca-Cuatro Cañadas (Malla 1).



### 1.5.2. Objetivo específico

- Realizar ensayos característicos al material a reciclar como contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg, límites de contracción, contenido orgánico de un suelo por ignición, equivalente arena, gravedad específica y peso específico de agregado grueso, tomando en cuenta las normas requeridas.
- Determinar la clasificación del material a reciclar.
- Realizar ensayos para la dosificación óptima como, Relación Humedad-Densidad, resistencia a la compresión de cilindros moldeados y Relación Soporté California CBR.
- Determinar la dosificación óptima para un valor mínimo de resistencia a la compresión de 2,5 MPa a los 7 días, para cada enfoque propuesto.
- Realizar el análisis comparativo entre los dos enfoques propuestos.

### 1.6. ALCANCE Y LIMITACIONES

El tramo carretero proporcionado por la ABC, fue la carretera Santa Cruz – Trinidad, tramo Cotoca – Cuadro Cañadas (Malla1)

Se determinaron las proporciones adecuadas de cemento Portland y aditivo NovoCrete para mezclar con los materiales reciclados, considerando las especificaciones técnicas y normativas aplicables.

Se llevó a cabo la preparación de muestras representativas de pavimentos reciclados con distintas proporciones de cemento Portland y aditivo NovoCrete, llevando a cabo los ensayos pertinentes.

Se analizaron los datos obtenidos de los ensayos para evaluar la influencia del cemento Portland y el aditivo NovoCrete en el comportamiento del pavimento reciclado.

Este proyecto se realizó a nivel de laboratorio, recopilando información del material de campo, limitando ensayos de laboratorio, lo cual permitió determinar las características físicas mecánicas del material a reciclar.

Para la investigación, se establecieron dos distintas dosificaciones, una con material a reciclar solo con cemento Portland como primer enfoque, y el mismo material a reciclar con la combinación de cemento Portland y el aditivo (NovoCrete) como segundo enfoque. Estas dosificaciones alcanzaron el valor de resistencia a la compresión de cilindros moldeados de 2,5 MPa a 7 días.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Pavimentos para carreteras

Un **pavimento** es un tipo de superficie dura hecha de material superficial duradero tendido en un área que está destinada a **transportar tráfico vehicular o peatonal**.

El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general, está conformada por capa de rodadura, base y subbase.

El pavimento de la carretera debe proporcionar **suficiente resistencia al deslizamiento**, calidad de conducción adecuada, características de reflejo de la luz favorable, y baja contaminación acústica.

**Capa de rodadura:** Es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto, de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito.

**Base:** Es la capa inferior a la capa de rodadura, que sostiene, distribuye y transmite las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante ( $CBR \geq 90\%$ ) o será tratada con asfalto, cal o cemento.

**Subbase:** Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular ( $CBR \geq 40\%$ ) o tratada con asfalto, cal o cemento.

##### 2.1.1. Pavimento flexible

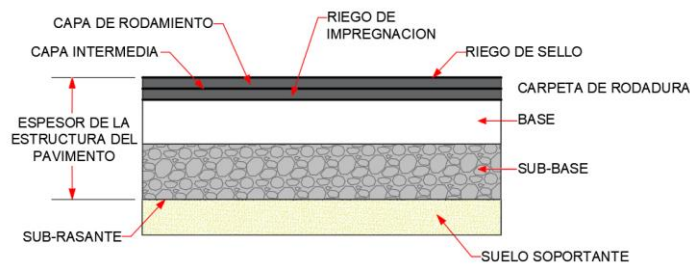
El pavimento flexible cuenta con una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa base y una capa subbase (de material granulado).

Por lo general, se usa para la construcción de carreteras e infraestructuras habilitadas para el tránsito de vehículos. Estas capas descansan sobre una capa de suelo compactado (subrasante), donde su capa de rodadura (que estará sometida a los máximos esfuerzos y condiciones más severas) se puede construir con:

- Concreto asfáltico (mezcla de arena y asfalto).
- Tratamientos superficiales con riegos bituminosos.

**La capa base** se compone de áridos (tratados o no previamente con cemento Portland, cal, asfalto u otros agentes estabilizantes) y su principal función es soportar y distribuir las cargas aplicadas a la subbase.

**La capa subbase** (que transmite las cargas al terreno y drena las aguas acumuladas para evitar la acción destructiva de las heladas) se compone de materiales de menor calidad (aprovechando un terreno estabilizado o usando materiales estabilizados o no).



**Figura 2.** Estructural de un Pavimento Flexible  
**Fuente:** (2017), Modelo estructural de pavimento



**Figura 3.** Distribución de cargas en un pavimento flexible  
**Fuente:** Ing. Martin Paucara Rojas, (2018), Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón



**Figura 4.** Pavimento Flexible  
**Fuente:** (2023), Elaboración propia

### 2.1.2. Pavimento rígido

El pavimento rígido se compone de una capa (losa) de hormigón de cemento Portland sobre una capa de base de grava que descansa sobre una capa de suelo compactado (subrasante).

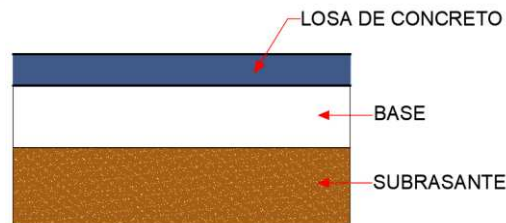
El cemento Portland tiene una enorme resistencia y rigidez, siendo un material que alivia las tensiones en las capas subyacentes por su alta resistencia a la flexión, cuando las tensiones y deformaciones provocan el agrietamiento por fatiga de las mismas tras un cierto número de repeticiones de carga.

Normalmente, este pavimento necesita determinados elementos estructurales y de seguridad que garanticen la durabilidad e integridad de la infraestructura, como los siguientes:

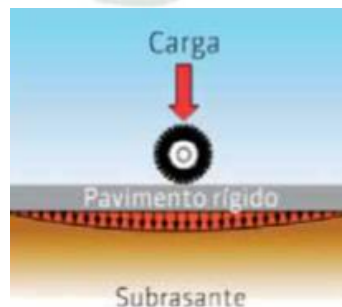
**Juntas de dilatación:** para determinar las dimensiones de las losas de pavimento y permiten controlar la formación de fisuras intermedias, tanto tras su construcción como durante su uso. También permiten dotar de transferencia de carga, facilitar el movimiento entre las propias losas y dividir la construcción.

**Pasadores de acero:** barras de acero lisas puestas entre las juntas transversales de las losas para transferir cargas sin restringir el movimiento horizontal de las losas.

**Barras de unión/distribución:** barracas de acero colocadas en las juntas longitudinales para mantenerlas ancladas, lo que garantizan una transferencia de carga apropiada.



**Figura 5.** Estructural de un Pavimento Rígido  
**Fuente:** (2017), Modelo estructural de pavimento



**Figura 6.** Distribución de cargas en un pavimento flexible  
**Fuente:** Marcelo Almeida Araujo, (2016), Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón



**Figura 7.** Pavimento rígido  
**Fuente:** (2023), Elaboración Propia

### 2.1.3. Componentes del Pavimento

Los pavimentos tienen tres componentes principales, la superficie, la estructura de pavimento y la subrasante. Cada uno de estos tiene un objetivo distinto y se definen a continuación.

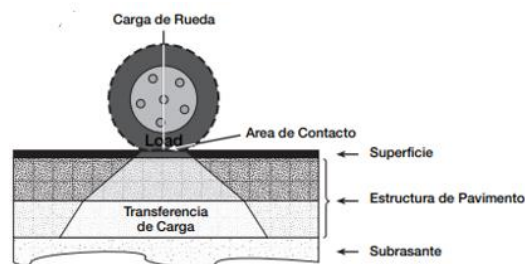
#### 2.1.3.1. Superficie

La superficie es la interfaz del pavimento con las solicitudes de tráfico y medioambiente. Su función es proteger la estructura de pavimento de ambos efectos destructivos, entregando durabilidad e impermeabilidad a la estructura

- ✓ Protección al tráfico
- ✓ Protección del medio ambiente

#### 2.1.3.2. Estructura de Pavimento

La estructura de pavimento transfiere la carga de tránsito desde la superficie hasta la subrasante, la carga aplicada por una rueda se reduce dentro de la estructura a medida que ésta se reparte en una superficie mayor. El pavimento generalmente está compuesto por varias capas de material, con distintas propiedades de resistencia. Cada capa tiene el objetivo de distribuir la carga que recibe desde la parte superior, a un área mayor en la parte inferior. Las capas ubicadas en la parte superior de la estructura están sujetas a tensiones mayores que aquellas en la parte inferior, y por lo tanto requieren de un material más resistente.



**Figura 8.** Transferencia de carga a través de la estructura del pavimento  
**Fuente:** (Noviembre de 2004), Wirtgen GmbH

**2.1.3.3. Subrasante**

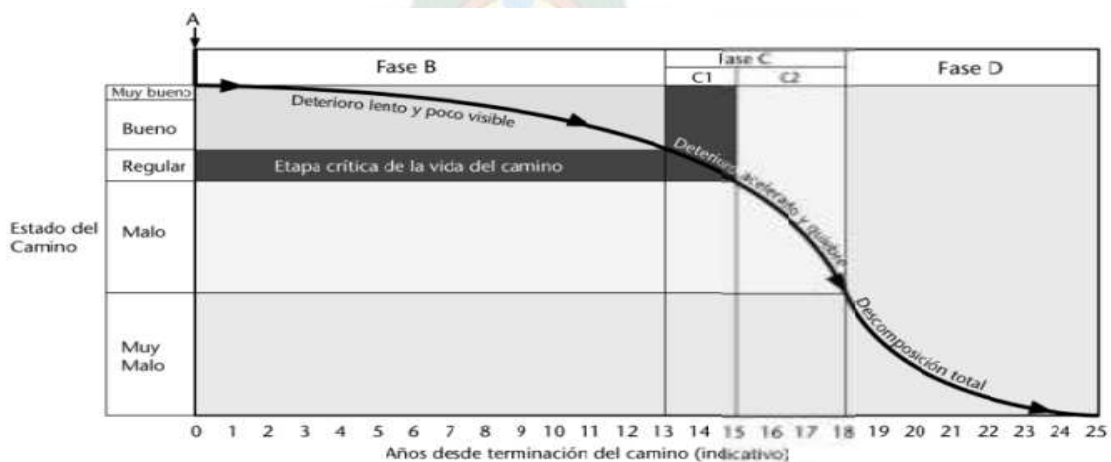
La subrasante o material natural que soporta la estructura de pavimento puede estar compuesto por material in-situ (si se trata de una condición de corte) o material importado a la obra (si se trata de una condición de relleno). Las características de resistencia del material de subrasante determinan las características de la estructura de pavimento requerida para disipar las fuerzas aplicadas en la superficie. Estas fuerzas deben ser reducidas hasta alcanzar una magnitud tal que pueda ser tolerada por la subrasante, evitando la deformación permanente de la misma. Los métodos de diseño de pavimentos generalmente utilizan la resistencia y rigidez de la subrasante como parámetros de entrada. La determinación de estos parámetros tiene por objetivo proveer a la estructura de la resistencia necesaria para proteger la subrasante. El espesor requerido usualmente es alcanzado mediante la construcción de capas seleccionadas de explanada o "capping" (por capas).

**2.1.4. El ciclo de deterioro de los caminos**

Los caminos, en líneas generales, independientemente del tipo de superficie de rodadura, están sometidos a un ciclo que consta de cuatro etapas. Las cuatro etapas del ciclo de un camino pavimentado, son las siguientes:

**2.1.4.1. FASE A - CONSTRUCCIÓN**

Se refiere a la fase de inversión inicial y el resultado inicial puede ser muy variado, desde una carretera muy bien construida, o con solo algunos defectos, o bien, mal diseñada o con una ejecución deficiente. De todos modos, el camino entra en servicio apenas terminada la obra. (Punto A del gráfico).



**Figura 9:** Curva de deterioro típica para una carretera pavimentada

**Fuente:** (1994), CEPAL

#### **2.1.4.2. FASE B - DETERIORO LENTO Y POCO VISIBLE.**

Durante un cierto número de años, el camino va experimentando un desgaste y un proceso de debilitamiento lento, principalmente en la superficie pavimentada, aunque en un menor grado, del resto de su estructura. Este desgaste se produce por la gran cantidad de vehículos pesados y livianos que circulan por él, aunque también por influencia del clima, del agua de lluvias o las aguas superficiales, la radiación solar, los cambios de temperatura, y otros factores. Por otro lado, la velocidad del desgaste depende también de la calidad de la construcción inicial. Para frenar este proceso de desgaste y debilitamiento, es necesario aplicar, con cierta frecuencia, diferentes medidas de conservación, principalmente en el pavimento y en las obras de drenaje. Además, hay que efectuar las operaciones rutinarias de mantenimiento. Al no ejecutar estas actividades, se acorta el período de desgaste lento y poco visible; en vez de durar 10 o 15 años, el período dura únicamente seis u ocho.

Durante toda la fase B el camino se mantiene aparentemente en buen estado y el usuario no percibe el desgaste. A pesar del aumento gradual de fallas menores aisladas, el camino sigue sirviendo bien a los usuarios y está en condiciones de ser conservado, en el pleno sentido del término. (Fase B del gráfico).

#### **2.1.4.3. FASE C - DETERIORO ACELERADO Y QUIEBRE.**

Después de varios años de uso, el camino entra en una etapa de deterioro acelerado y resiste cada vez menos el tránsito. (Fase C del gráfico). Al inicio de esta fase, la estructura básica del camino aún sigue intacta, las fallas en la superficie son menores, y el usuario común tiene la impresión de que el camino aún se mantiene sólido; sin embargo, no es así. (Fase C1 del gráfico). Más adelante en la fase C, se pueden observar cada vez más daños en la superficie y comienza a deteriorarse la estructura básica, que no es visible.

Estos daños comienzan siendo puntuales, y luego se van extendiendo hasta que finalmente afectan la mayor parte del camino. (Fase C2 del gráfico). La fase C es relativamente corta, ya que comprende un período de entre dos y cinco años. Una vez que el daño de la superficie se generaliza, la destrucción es acelerada. Al inicio de la fase C (Fase C1 del gráfico), normalmente basta con reforzar la superficie del camino, lo que supone un costo relativamente bajo. Una vez efectuado un refuerzo adecuado, el camino vuelve a estar apto para su función y puede resistir al tránsito durante una óptima cantidad de años más. Al avanzar dentro de la fase C (Fase C2 del gráfico), y deja pasar el momento óptimo de intervención, el simple refuerzo de la superficie ya no es

suficiente. Primero deben repararse los daños que se han producido en la estructura básica del camino, posteriormente colocar el refuerzo sobre toda la superficie del camino. Frecuentemente, se utiliza el término “rehabilitación” cuando se alude a la combinación de reparaciones parciales en la estructura básica del camino con el refuerzo de su superficie.

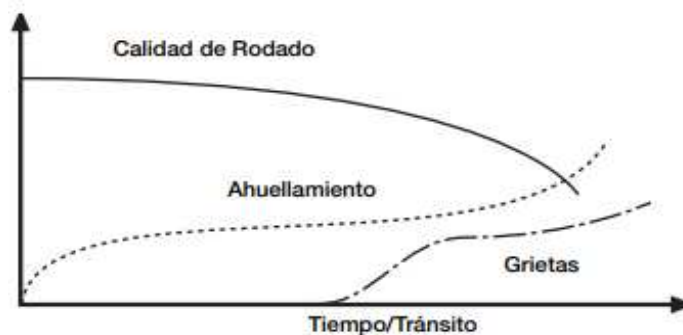
Al no intervenir en momento alguno durante la fase C, el camino llega al punto de quiebre, es decir, se produce una falla generalizada, tanto del pavimento como de la estructura básica. Al finalizar la fase C y durante la fase D, únicamente cabe reconstruir completamente el camino, a un costo que puede equivaler a entre 50% y 80% del valor de un camino completamente nuevo.

#### 2.1.4.4. FASE D – PÉRDIDA TOTAL.

La pérdida total del camino constituye la última etapa de su existencia y puede durar varios años. Durante ese período, lo primero que se observa es la pérdida de pavimento. Cada vez que pasa un vehículo pesado se desprenden trozos de capa asfáltica, hasta que al final termina siendo un camino de grava y a la larga, de tierra. (Fase D en el gráfico). El paso de los vehículos se dificulta, la velocidad promedio de circulación baja bruscamente y la capacidad del camino queda reducida a únicamente una fracción de la original.

#### 2.1.5. Factores que Causan el Deterioro del Pavimento

Los pavimentos se deterioran por un gran número de factores, los dos más importantes son los efectos *medioambientales* y *las cargas de tráfico*. El deterioro del pavimento es normalmente medido indirectamente por la calidad de rodado, pero las características visibles como el ahuellamiento y agrietamiento superficial también son relevantes. La Figura 10 muestra cómo estas 3 características relacionan el paso del tiempo y el efecto acumulativo de las cargas de tráfico. El deterioro gradual de los pavimentos es causado por una combinación de los factores ambientales y de tráfico.



**Figura 10.** Indicadores de deterioro de pavimentos

**Fuente:** (Noviembre de 2024), Wirtgen GmbH



- ✓ **Factores ambientales:** Los factores medioambientales son responsables de la mayor parte del inicio del agrietamiento superficial. El principal factor que contribuye a este fenómeno es la radiación ultravioleta solar, que causa un endurecimiento lento pero continuo del asfalto. Con el endurecimiento, la capa asfáltica reduce su elasticidad, lo que produce el agrietamiento cuando la superficie se contrae al disminuir su temperatura. Una vez que la integridad de la superficie se pierde debido al agrietamiento, el pavimento tiende a deteriorarse a una tasa mayor producto del ingreso del agua a las capas subyacentes.
- ✓ **Efectos del tráfico:** La carga de tráfico es la responsable de la aparición del ahuellamiento y de la aparición de grietas dentro de la estructura de pavimento. Todo vehículo que utilice un camino va a producir una pequeña deformación momentánea en la estructura de pavimento. Sin embargo, la deformación producida por un vehículo liviano (automóvil) es insignificante, mientras que los vehículos pesados producen grandes deformaciones. El paso de una gran cantidad de vehículos tiene un efecto acumulativo que gradualmente lleva a una deformación permanente y/o agrietamiento de fatiga en el pavimento. Es importante destacar que los ejes sobrecargados de los camiones pesados producen un efecto extremadamente nocivo en la estructura de pavimento, acelerando el deterioro.
- ✓ **Consecuencias del agrietamiento:** Una vez que el agrietamiento llega a la superficie, el agua puede ingresar libremente dentro de la estructura. Como se describió previamente, los efectos de la pérdida de capacidad de soporte producida por el agua, llevan a la reducción de la resistencia de la estructura. Esta disminución de la resistencia causa una tasa de deterioro mayor bajo las cargas de tráfico repetitivas. Además, el agua en un material saturado puede llegar a ser un elemento destructivo cuando el pavimento está sometido a cargas pesadas. Después de producido el agrietamiento, se observará la rápida formación de baches y un deterioro progresivo aún mayor.

#### 2.1.6. Auscultación de pavimento

Al evaluar la viabilidad y efectividad la necesidad de aplicar métodos de rehabilitación distintos de superposiciones, se deben considerar varios factores, incluyendo determinar el deterioro de la superficie, la condición estructural y condición funcional del pavimento existente,

son aspectos importantes para asegurar la calidad y el rendimiento adecuado de la carretera rehabilitada. Los deterioros del pavimento se pueden clasificar como causados por cargas de tráfico o factores sin carga, incluidos el diseño, la construcción, los materiales de baja durabilidad y los factores climáticos.

#### ***2.1.6.1. Auscultación funcional***

La auscultación funcional se centra en determinar cómo la carretera responde a las demandas del tráfico y del medio ambiente. Están relacionados con la superficie del pavimento, es decir, la capa superior del pavimento, incluyendo el aspecto como la comodidad del usuario, la resistencia al deslizamiento textura (IFI), regularidad superficial longitudinal (IRI) y fallas superficiales (PCI).

#### ***2.1.6.2. Auscultación estructural***

La auscultación estructural se centra en determinar las características de la estructura de pavimento, las cuales están relacionadas con la calidad de los materiales y espesores de las capas del pavimento (no afecta directamente al usuario), determinando las deformaciones del pavimento (Deflexiones).

Ambas evaluaciones son complementarias y se utilizan para garantizar el estado del pavimento, si este cumple con los requisitos de rendimiento funcional y estructural establecidos para su uso seguro y eficiente.

#### **2.1.7. Operación de Rehabilitación**

Normalmente, existen varias opciones para la rehabilitación de un camino deteriorado

##### ***2.1.7.1. Rehabilitación Superficial***

Las medidas de rehabilitación superficial están dirigidas a los problemas que, relacionados con el asfalto y sellos superficiales. Estos problemas se relacionan normalmente al envejecimiento del asfalto y al agrietamiento que se inicia en la superficie debido a las fuerzas térmicas.

Los métodos comúnmente utilizados para tratar estos tipos de problemas son:

- ✓ ***Recapado asfáltico***
- ✓ ***Fresado superficial y reemplazar de material***
- ✓ ***Reciclado superficial***

El procedimiento es que la superficie es fresada, cepillada o escarificada, triturada y adicionada o no de un agente de reciclaje, con o sin la incorporación de pequeños porcentajes de

materiales vírgenes, reacondicionada y compactada. El proceso puede adelantarse en caliente o en frío y en este último caso el agente de reciclaje, si se requiere, se aplica en forma de emulsión.

### ***2.1.7.2. Rehabilitación Estructural***

La rehabilitación para eliminar los problemas dentro de la estructura de pavimento se entiende como una solución de largo plazo. Debe tomarse en cuenta que la estructura de pavimento está deteriorada. Además, mejorar el estándar de un pavimento existente por el reforzamiento de la estructura (por ejemplo, un camino no pavimentado de grava a estándares pavimentados) puede ser considerado como una forma de rehabilitación.

La densificación (o consolidación) de los materiales granulares es, una forma de mejorar la calidad del material. Entre mayor sea la densidad natural del material, mejores serán sus características de resistencia. Sin embargo, las consecuencias de la densificación causan problemas en las capas subyacentes, especialmente en las capas construidas con material ligante.

Algunas de las opciones típicas para rehabilitación estructural incluyen:

- ✓ ***Construcción de capas adicionales (tanto de material granular como de material asfáltico) sobre la superficie existente***
- ✓ ***Reciclado profundo***
- ✓ ***Reconstrucción total***

## **2.2. Reciclaje de Pavimentos**

El reciclado o "reutilización", es una técnica de rehabilitación cuyo objetivo fundamental es transformar un pavimento degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar, consiste en reutilizar sus materiales para la construcción de una nueva capa mediante la disgregación de estos en una cierta profundidad, la adición de un conglomerante (en la mayor parte de los casos se emplea cemento o emulsión bituminosa), agua, eventualmente áridos (como correctores granulométricos o con otros fines) y algún aditivo, de acuerdo con una proporción obtenida previamente mediante ensayos. La mezcla homogénea de estos materiales se extiende, compacta y cura adecuadamente, constituyendo una base o capa que asume la mayor resistencia estructural del nuevo pavimento.

Los datos de deterioro son útiles para determinar los mecanismos de deterioro del pavimento. Los deterioros del pavimento se pueden clasificar como causados por cargas de tráfico o factores sin carga, incluidos el diseño, la construcción, los materiales de baja durabilidad y los factores climáticos, etc.

El reciclado tiene sus orígenes después de finalizada la Segunda Guerra Mundial las primeras aplicaciones fue en el Reino Unido con un proceso llamado 'retread process' para reparar las vías secundarias dañadas por la guerra el cual consistía en escarificar la superficie dañada mezclarla con algún aditivo ya sea necesario.

Países industrializados y desarrollados como Estados Unidos, Holanda, Alemania, Brasil, entre otros, han desarrollado e implementado nuevas y eficientes técnicas de reciclaje en la realización de nuevas vías o en la rehabilitación, obteniendo excelentes resultados durante los últimos 40 años.

El proceso de reciclar en pavimentos ya utilizados, es decir, volver a usar material que ya prestaron un servicio, comenzó a tener importancia desde que el hombre, agrupando grandes centros urbanos, fue consciente de la gran cantidad y volumen de desecho que se produce cada día. Los efectos sobre la salud, en primer lugar, los impactos que producían contra el ambiente en un segundo lugar y de manera muy reciente el valor económico, en tercer lugar, motivaron desarrollos encaminados a reutilizar los materiales básicos.

En Bolivia, desde hace pocos años, el Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón cumplen una labor de investigación en algunos proyectos ejecutados en Bolivia con similar metodología, como por ejemplo el tramo Cotoca – Pailón (Paraíso) y el tramo Río Seco - desaguadero.

### **2.2.1. Propósitos del reciclaje**

Una de las ventajas de la técnica de reciclaje desde el punto de vista de la protección ambiental y ecológica es bien conocida y evidente, debido a una menor necesidad de extraer materiales granulares en canteras.

De hecho, en muchas regiones del país existe escasez de materiales granulares de calidad adecuada para su uso, lo que obliga a utilizar materiales alejados del lugar de la obra.

La selección del reciclaje entre las distintas alternativas disponibles para la restauración de un pavimento depende de varios factores, entre los que se pueden mencionar la observación de defectos del pavimento, determinación de causas probables de defectos, con base en estudios de laboratorio y campo. Información del proyecto e historia de intervenciones de conservación, historia de desempeño del pavimento, restricciones a la geometría de la vía (horizontal y vertical), factores ambientales, el tráfico etc., realizando pruebas de laboratorio y de campo para determinar

las reservas de materiales disponibles en el pavimento y los tipos de estabilizadores que se pueden utilizar con estos materiales.

El objetivo fundamental del reciclado de un pavimento es mejorar las características y comportamiento como, por ejemplo:

- ✓ Transformación de un pavimento degradado y heterogéneo en una estructura resistente y más homogénea
- ✓ Incremento de la capacidad de soporte, adaptándola a las sollicitaciones del tráfico
- ✓ Incremento de la durabilidad, y con ello, reducción de la susceptibilidad al agua e incremento de la resistencia a la erosión
- ✓ Protección de la subrasante y de las capas inferiores del pavimento, cuyas características son a veces deficientes.

### **2.2.2. Tipos de Reciclado**

Como parte del presente estudio, se han identificado las técnicas de rehabilitación y construcción basadas en el reciclaje de pavimentos con más auge en la actualidad y por cuya importancia y resultados a través del tiempo, se han posicionado dentro del mercado del desarrollo de infraestructura vial internacionalmente como sostenibilidad y ahorro.

Las máquinas de reciclado han evolucionado durante los años, desde las primeras máquinas modificadas para fresar y estabilizar suelos, hasta las recicladoras especializadas utilizadas hoy en día. Las recicladoras están especialmente diseñadas para lograr reciclar capas de pavimento de gran espesor en una sola pasada.

Las recicladoras modernas tienden a ser máquinas grandes y potentes, las cuales pueden estar montadas sobre orugas o sobre neumáticos de flotación.

Es importante tener en cuenta que, como en todo proyecto de Ingeniería, no hay una única solución y su desarrollo depende, en gran parte, de las condiciones previas a su implantación.

#### **i. Por el lugar donde se lleva a cabo la mezcla**

- ✓ In Situ
- ✓ In situ "En caliente"
- ✓ In situ "En Frío con cemento"
- ✓ In situ "En Frío con Emulsiones Bituminosas"
- ✓ En Planta

#### **ii. Por la temperatura de mezcla**

- ✓ En Frío.
- ✓ En Caliente

**iii. Por el tipo de material a reciclar**

**iv. Por el tipo de ligante**

- ✓ Cal y Cemento
- ✓ Emulsión Bituminosa
- ✓ Betún Espumado

**2.3. Aplicaciones de reciclado**

El reciclado es un proceso con múltiples aspectos que puede satisfacer muchas necesidades en el mantenimiento y rehabilitación en la infraestructura vial. Depende de si el material es tratado o no con un agente ligante.

**2.3.1. Reciclado Superficial**

El reciclaje superficial se lleva a cabo como un medio para eliminar el agrietamiento severo de las capas asfálticas, a su vez, mejorar el índice de servicio. Frecuentemente, se desarrolla esta categoría de reciclaje como una estrategia a corto plazo, pero también puede usarse en aquellos pavimentos en los que las capas asfálticas superiores son débiles. Los espesores del reciclaje superficial varían entre 80 y 150 mm.

Con el reciclaje superficial, puede existir un ligero mejoramiento de la capacidad estructural del pavimento, debido al efecto del revestimiento asfáltico que normalmente se aplica sobre la capa tratada. La limitación al ingreso de agua a las capas inferiores también tenderá a prolongar la vida del pavimento.

Lo siguiente se incluye como una referencia rápida de los métodos de investigación

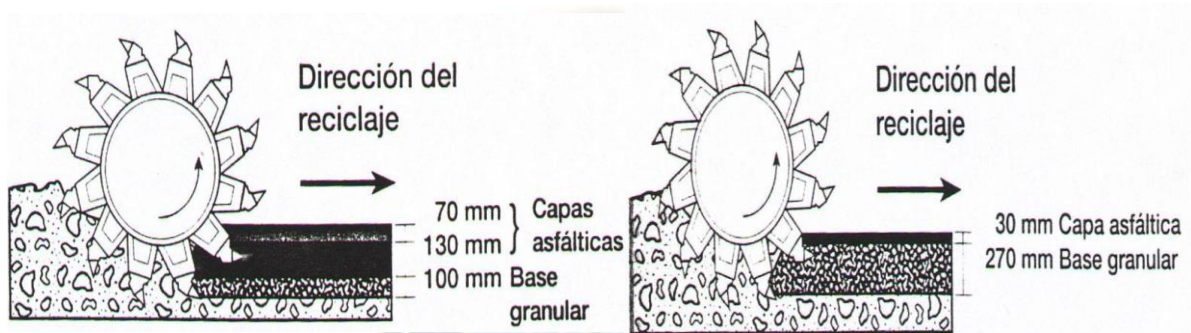
- Inspección visual
- Verificación del espesor de las capas asfálticas, normalmente por medio de la toma de núcleos
- Medidas de la profundidad de ahuellamiento
- Ejecución de apiques hasta la profundidad de reciclaje propuesta con el objeto de tomar muestras para los diseños de las mezclas.

**2.3.2. Reciclado Profundo**

El reciclaje profundo abarca un amplio espectro de aplicaciones y cubre estrategias de diseño a mediano y largo plazo, con el propósito de reforzar el pavimento que está deteriorado.

Los revestimientos sobre la superficie de la capa reciclada mejoran las propiedades de funcionalidad, tales como la resistencia al deslizamiento y el índice de servicio. Los espesores típicos del reciclaje profundo superan los 150 mm.

El reciclaje profundo resulta adecuado para reforzar los pavimentos deteriorados que tienen capas asfálticas gruesas o delgadas. En la siguiente figura se indican dos ejemplos de reciclaje profundo. En ambos casos, la profundidad de reciclaje es de 300 mm, nótese que la capa asfáltica son de diferentes espesores: una gruesa y la otra delgada.



**Figura: 11:** Reciclaje profundo a 300 mm con diferentes espesores de capa asfáltica  
**Fuente:** Carmen Elena Rodríguez Mineros-José Antonio Rodríguez Molina, (2004), Evaluación y rehabilitación de pavimentos flexibles por el método del reciclaje

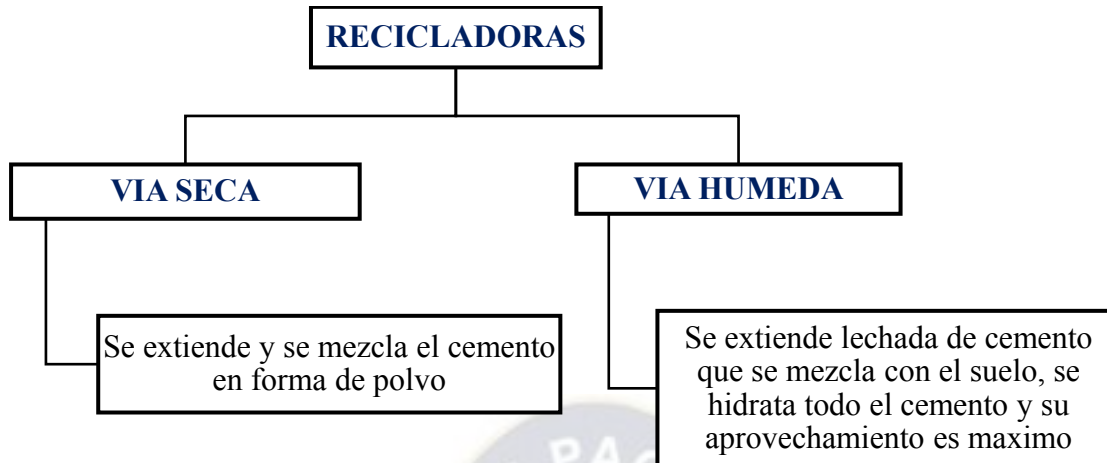
Una vez realizado el reciclaje, se requiere un revestimiento nuevo. Para vías con tráfico liviano, este revestimiento puede ser un sello o una carpeta asfáltica delgada de mezcla en caliente. En las situaciones en las que el pavimento soporta tráfico pesado, puede necesitar una base asfáltica, así como de una rodadura asfáltica. Con espesores que sean capaces de resistir las cargas vehiculares adecuadamente sin sufrir daños prematuros durante su vida útil.

Lo siguiente se incluye como una referencia rápida de los métodos de investigación

- Inspección visual
- Apiques y toma de muestras para ensayos de laboratorio
- Toma de núcleos
- Pruebas con el Penetrómetro Dinámico de Cono (DCP)
- Medidas de la profundidad de ahuellamiento
- Medidas de deflexiones

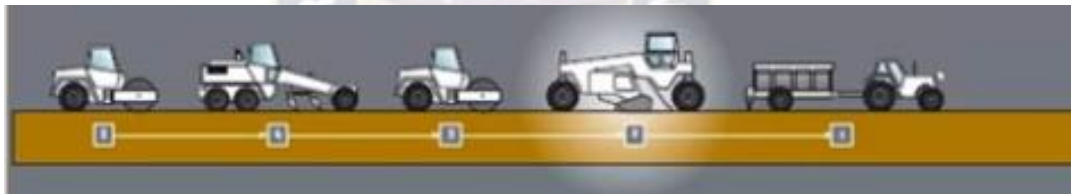
#### 2.4. Equipo para la realización de obras de reciclado

La vía más adecuada por la que se realizará el reciclado, seca o húmeda, será determinada en función de las características de cada obra.

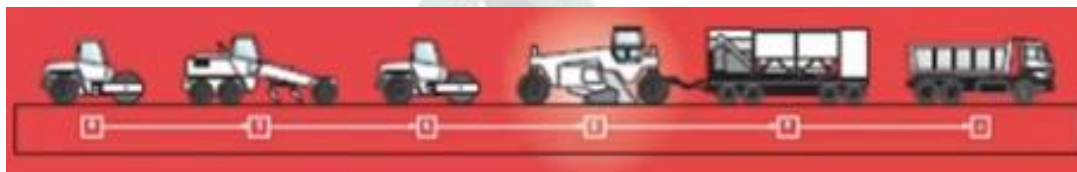


**Figura 12.** Tipos de técnica utilizada  
**Fuente:** Elaboración propia

Ambas vías siempre serán las más adecuadas siempre que se controlen los parámetros de calidad indicados, tales como el contenido de cemento, distribución homogénea de cemento, el espesor de reciclado, la humedad y compactación adecuada del material, la granulometría de la mezcla, el tiempo de trabajabilidad u otros.



**Figura 13.** Procedimiento de vía seca - Cemento en polvo  
**Fuente:** (2011), Maquinaria para el reciclaje en frío



**Figura 14.** Procedimiento de vía húmeda - Cemento como lechada  
**Fuente:** (2011), Maquinaria para el reciclaje en frío

En las obras de reciclado de pavimento existente hay que distinguir dos etapas:

Una primera etapa, que comprende el conjunto de operaciones hasta lograr la disgregación del pavimento en la profundidad requerida.

- ✓ Distribuidor de cemento (polvo o lechada)
- ✓ Recicladoras (equipo de fresado y/o mezclado)



Una segunda etapa, en la que se realiza la nivelación y compactación de la mezcla así obtenida, y la protección final de la misma mediante un riego de curado.

- ✓ Equipo para prefisuración
- ✓ Rodillo
- ✓ Motoniveladoras
- ✓ Cisternas
- ✓ Cisternas de emulsión

En caso de que el pavimento contenga un porcentaje elevado de elementos de tamaño superior a 80 mm para evitar daños en la recicladora, debe procederse a una disgregación de este y eliminación de dichos elementos mediante retirada o machaqueo, seguida de una nivelación antes de realizar la extensión del conglomerante y de los eventuales áridos de aportación. Esta operación únicamente debe realizarla la recicladora si no es preciso eliminar elementos gruesos.

En épocas calurosas o en condiciones favoreciendo la desecación, debe disponerse de un equipo de pulverización de agua para mantener la humedad de la superficie antes de la extensión del riego de curado.

Se han resumido las distintas operaciones y equipos a utilizar tanto en el reciclado con cemento de un camino de baja intensidad de tráfico, como en el de una carretera principal de cualquier tipología de tráfico (el orden de las operaciones no es indicativo, pues depende del proceso).

**Tabla 2.** Equipo para la realización de las distintas operaciones de reciclado de una carretera

<b>Operaciones</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Equipos usuales</b>
Disgregación	Disgregar el pavimento existente	Motoniveladora con ripper Bulldozer con Ripper Recicladora
Eliminación de elementos gruesos	Supresión de elementos de tamaño superior a 80 mm. mediante machaqueo mediante retirada de estos	Machacadora in situ o móvil Equipos agrícolas
Nivelación	Reparto de los materiales procedentes de la disgregación del firme	Motoniveladora
Aporte de áridos	Mejora de la granulometría Corrección de peraltes Aumento del espesor a tratar	Distribuidor Extendedora de mezcla Motoniveladora
Humectación	Obtención de la humedad óptima. Proctor modificado	Barra regadora Camión cisterna acoplado a recicladora Distribuidor de lechada

Distribución del conglomerante	Aporte de conglomerante en la dotación requerida de acuerdo con la fórmula de trabajo y el espesor a tratar	Manual (cuadrícula de sacos solo en obras muy pequeñas) Distribuidor de conglomerante (en polvo o en lechada)
Mezclado	Mezcla homogénea del firme Estabilizador de suelos disgregado con el conglomerante, Recicladora el agua y los eventuales áridos de aportación	Estabilizador de suelos Recicladora
Refino	Eliminación de material sobrante para obtención de cota definitiva y rasante. Mejora de la regularidad superficial	Motoniveladora
Realización de juntas transversales	Control de la fisuración	Equipos manuales Equipos mecanizados Rodillo vibratorio delantero
Compactación	Obtención de la densidad requerida	Rodillo mixto Rodillos neumáticos
Riego de curado y protección	Curado de la capa reciclada Protección del riego de curado	Extendedora de emulsión Extendedora de gravilla Rodillo neumático a veces

Fuente: Elaboración propia

En el caso de que no haya disponibilidad de equipos especializados y la vía tiene baja intensidad de tráfico, la maquinaria básica necesaria serán las siguientes.

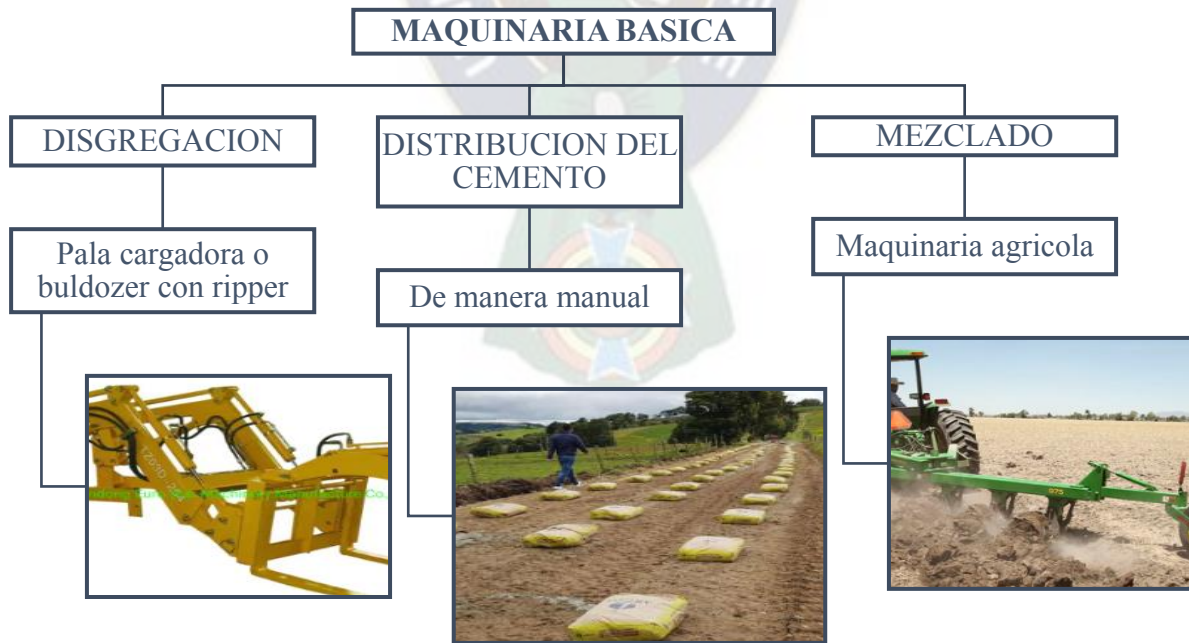


Figura 15. Maquinaria básica  
Fuente: Elaboración propia

Se debe utilizar maquinaria específica para este trabajo de reciclado. Habitualmente, la maquinaria agrícola no tiene la potencia necesaria para hacer este trabajo en condiciones de seguridad en cuanto al espesor tratado y a la calidad de la mezcla obtenida. No es lo más recomendable, ya que no es uniforme y se requiere mucho control. Se podrá utilizar maquinaria básica siempre y cuando la vía no sea de mucha importancia y un espesor máximo de 12 cm

#### **2.4.1. Descripción de los principales equipos para un reciclado profundo**

Como se ha visto en las tablas anteriores, en la realización de las obras de reciclado se utilizan distintos equipos, cada uno de los cuales tiene una influencia mayor o menor en la calidad final del reciclado. Dentro de los mismos, puede asignarse una especial importancia a los siguientes:

- ✓ Distribuidores de conglomerante
- ✓ Recicladoras
- ✓ Equipos para la realización de juntas en fresco
- ✓ Rodillos

##### **2.4.1.1. Distribuidores de conglomerante**

La distribución manual del conglomerante, formando previamente una cuadrícula de sacos a la distancia requerida, solamente es admisible en obras muy pequeñas. La distribución en sacos puede ser muy precisa, pero la forma en la que se hace implica un rendimiento muy pequeño que encarece este y el resto de los trabajos como mezclado, nivelado y compactación final de la mezcla, por lo que habitualmente no se recomienda este sistema.

En los restantes casos debe procederse a una extensión mecanizada del mismo, para lo cual existen dos tipos diferentes de equipos:

- ✓ Distribución de conglomerante en forma pulverizada (sistema denominado vía seca)



**Figura 16.** Distribución del cemento

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes

- ✓ Distribución de conglomerante de lechada (sistema denominado vía húmeda)



**Figura 17.** Distribución en forma de lechada

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes

#### 2.4.1.2. *Recicladoras*

Equipos para reciclado in situ que son desarrollo de otros concebidos inicialmente para la estabilización de suelos (Wirtgen, Caterpillar, CMI, Bomag, etc.).

Un rotor alojado dentro de una carcasa protectora, situada en la parte central del equipo, es el encargado de fresar el firme existente y de mezclar el material resultante con el agua y el cemento. La mezcla así obtenida sale por una compuerta regulable situada en la parte trasera de la carcasa. Esta última va provista de una barra regadora con una serie de dispositivos para la inyección de agua y lechada de cemento. Actualmente, el rotor de fresado lleva montadas picas con punta de widia, por lo que no suele haber cambios respecto al rotor empleado en una estabilización. El giro de este se realiza de forma que los materiales arrancados son lanzados hacia la parte delantera de la carcasa. Las picas van montadas en el rotor siguiendo una disposición helicoidal, a fin de facilitar la mezcla de los materiales.



**Figura 18.** Máquinas recicladoras de diferentes marcas

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes

Algunos modelos incluyen dentro del equipo reciclador una tolva de dosificación del cemento para obtener un equipo más operativo que el formado por la recicladora y la dosificadora de lechada.



**Figura 19.** Recicladora Wirtgen WR 2500 S en frío y estabilizadora de suelos  
**Fuente:** (Noviembre de 2012), Wirtgen GmbH

Dichos equipos pueden ser utilizados en general en carreteras de todo tipo de tráfico, incluso si el firme contiene capas de mezcla bituminosa u otros materiales tratados.

Equipos de reciclado derivados de las fresadoras de pavimentos, pero que, a diferencia de estas últimas, además de levantar el material del firme, realizan una mezcla del mismo con cemento y con agua. El rotor se encuentra dentro de una cámara de mezclado situada igualmente en la parte central del equipo. Unas cuñas deslizantes provistas de rejillas, situadas delante de la cámara, evitan que penetren en la misma las placas que se forman al fresar el pavimento, sobre todo cuando el ligante se encuentra en mal estado o el pavimento está agrietado. La cámara va provista de un sistema doble de inyectores para entrada de líquidos. El material mezclado sale de la cámara en forma de cordón. En la parte trasera de la máquina, un sinfín ajustable en altura lo distribuye delante de una regla vibrante extensible que realiza una pre-compactación del material. Para el reciclado con cemento se dispone de equipos con potencias del orden de 600 HP, anchos de fresado de 2 m y profundidades máximas de reciclado de 40 cm.

#### **2.4.1.3. Rodillos**

Aunque se trata de máquinas utilizadas en un gran número de unidades de obra, la importancia que tiene en un reciclado (como en todas las capas tratadas con cemento) la obtención de una densidad elevada, sobre todo en el fondo de la capa, hace conveniente insistir en las características que deben reunir los equipos de compactación. Una compactación adecuada es un factor fundamental de cara a obtener una buena resistencia a fatiga de la capa tratada.

Un parámetro fundamental en la eficacia de la compactación es la carga estática por unidad de longitud de generatriz, la cual está muy ligado al espesor reciclado. Atendiendo al mismo, se pueden distinguir los tipos de rodillos que se indican en la siguiente tabla

**Tabla 3.** Clasificación de los rodillos lisos vibratorios

<b>TIPO DE RODILLO VIBRATORIO</b>	<b>CARGA ESTÁTICA POR UNIDAD DE LONGITUD GENERATRIZ</b>	<b>ESPESOR DE CAPA MÁS ADECUADO</b>
Rodillos ligeros	100-250 N/cm	10-15 cm
Rodillos medios	250-350 N/cm	15-25 cm
Rodillos pesados	350-550 N/cm	25-40 cm

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 20.** Compactado con rodillo liso

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes

## 2.5. Ejecución, de las obras en un reciclado profundo

Normalmente el reciclado se realiza en carreteras en las que hay que dar paso alternativo a los vehículos, por lo que hay que prever desvíos o bandas de paso alternadas.

La realización de una obra de reciclado in situ se desarrolla, de acuerdo con el siguiente proceso:



**Figura 21.** Ejecución de las obras para un reciclado profundo  
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.5.1. Preparación de la superficie existente

Para la preparación de la superficie se debe realizar el barrido para eliminar los materiales perjudiciales como trozos de arcilla o materia orgánica, colocación de material para alcanzar la cota deseada en el caso de que se quisiera rectificar la existente, realización de los ensanches proyectados, etc.

En caso necesario, machaqueo o cribado y aporte de material como corrección granulométrica, para obtener el espesor necesario a reciclar o para lograr la rasante y los peraltes adecuados.



**Figura 22.** Área delimitada para el reciclado

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes



**Figura 23.** Preparación de la superficie existente antes del reciclado

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes

### 2.5.2. Extensión del conglomerante

Siempre es recomendable la vía húmeda por la presencia del cemento en polvo en el suelo pueda significar un inconveniente, tales como carreteras con tráfico abierto, presencia de fuerte viento o zonas de especial afección medioambiental.

La vía más adecuada por la que se realizará el reciclado, seca o húmeda, será determinada en función de las características de cada obra, siendo necesaria la vía húmeda siempre que la presencia del cemento en polvo en el suelo pueda significar un inconveniente, tales como carreteras con tráfico abierto, presencia de fuerte viento o zonas de especial afección medioambiental.

Siempre que se controlen adecuadamente los parámetros, tales como el contenido y distribución homogénea de cemento, el espesor de reciclado, la humedad y compactación adecuada del material, la granulometría de la mezcla, el tiempo de trabajabilidad u otros.

Dependiendo del sistema de realización, el cemento se extenderá antes o después de escarificar y disgregar el pavimento. Si la máquina realiza conjuntamente las operaciones de escarificado y mezclado, el cemento podrá extenderse previamente o como lechada en el mismo proceso en la proporción correspondiente



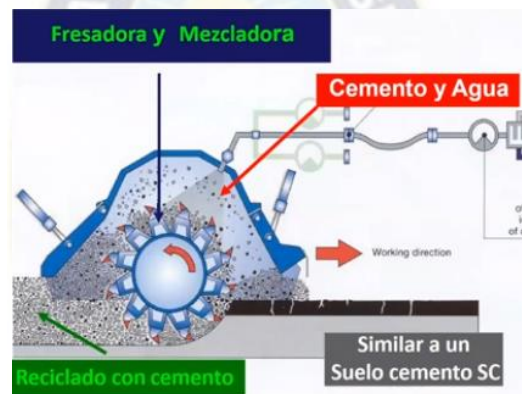


**Figura 24.** Extensión de cemento en forma seca y húmeda

**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de firmes

### 2.5.3. Escarificado y mezclado

Para asegurar una buena homogeneidad del material reciclado y una profundidad uniforme de mezclado, se debe utilizar una recicladora con la potencia requerida



**Figura 25.** Esquema del avance del rotor de la recicladora

**Fuente:** (Noviembre de 2012), Wirtgen GmbH

Lo más habitual es que el escarificado del pavimento y la mezcla con el cemento y el agua sean llevados a cabo simultáneamente por la recicladora. No obstante, existen equipos que son más bien cámaras de mezclado, precisando la escarificación previa al pavimento, con los que pueden alcanzar hasta 5,75 m de ancho de extendido. Con ello disminuyen los riesgos de juntas longitudinales. El trabajo de reciclado se puede realizar por carril, con un traslape de 30 cm así pueda permitirse el tráfico por el otro carril



**Figura 26.** Trabajo de reciclado por carril

**Fuente:** Ing. Roger Flores Laura, (2016), Reciclado de pavimentos flexibles en Bolivia

#### 2.5.4. Humectación

Una de las variables que requieren más atención y control durante todo el proceso de reciclado es la humedad. Para el mezclado habrá que añadir el agua necesaria para que, descontando la humedad natural del material, se obtenga la óptima del ensayo Proctor Modificado. En los casos en los que dicha humedad natural sea superior a la requerida, será necesario orear previamente el material, realizando una pasada de la recicladora sin añadir el conglomerante

#### 2.5.5. Prefisuración (realización de juntas en frío) o fisuración controlada.

Es importante considerar la realización de juntas o prefisuración para controlar la formación de grietas y mejorar la durabilidad del nuevo pavimento.

Los pavimentos reciclados con cemento se comportan de manera similar a los semirrígidos convencionales o con una base de material tratado. Como ya se ha mencionado, el contenido de cemento de una capa reciclada se ajusta para obtener unas características resistentes similares exigidas. Un material de este tipo suele presentar una *fisuración espontánea fina y a distancias cortas*. Sin embargo, las heterogeneidades del pavimento existente pueden dar lugar a unas dispersiones importantes en las resistencias in situ, que con frecuencia alcanzan valores más elevados.

Dichas fisuras, que en obras secundarias no suelen tener importancia, en carreteras para tráficos más elevados puede dar lugar a problemas como la fatiga acelerada del pavimento



**Figura 27.** Prefisuración de juntas tras terminar el reciclado

**Fuente:** Ing. Roger Flores Laura, (2016), Reciclado de Pavimentos Flexibles con Cemento - IBCH

Es importante seleccionar el tipo adecuado de juntas y prefisuración según las condiciones específicas del proyecto, incluidos el tipo de pavimento, el tráfico esperado, el clima y otros factores ambientales. Un diseño cuidadoso de juntas, puede mejorar significativamente la durabilidad y el rendimiento del pavimento reciclado.

Una de las alternativas de la realización de juntas:



**Figura 28.** Proceso de una de las alternativas de prefisuración  
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.5.6. Compactación

La composición del equipo de compactación, así como el número de pasadas necesario, deberán definirse mediante un tramo de ensayo.

Para materiales reciclados in situ mediante el cual se fija en el tramo de trabajo el número de pasadas de rodillo y la densidad de referencia, que es conveniente efectuar en cada obra o cada vez que cambien las características del suelo a reciclar



**Figura 29.** Compactación de un tramo  
**Fuente:** Ing. Roger Flores Laura, (2016), Reciclado de Pavimentos Flexibles con Cemento - IBCH

En general, es conveniente que el equipo de compactación esté compuesto, como mínimo, por un rodillo vibratorio o uno mixto (que en ocasiones se complementa con otro de neumáticos). En algunas obras se emplean con buenos resultados dos rodillos vibratorios típicos del movimiento de tierras, se consigue la compactación deseada en poco tiempo porque este está limitado por el plazo de trabajabilidad de la mezcla.

La compactación debe realizarse con la menor demora posible tras el mezclado por un doble motivo:

Una compactación es fundamental para obtener la resistencia necesaria y un buen comportamiento del pavimento reciclado, por lo que debe alcanzar la mayor densidad posible. Es recomendable conseguir el 100% (Proctor modificado), y en todo caso el 97% (Proctor modificado) como valor medio en el espesor reciclado. Ello requiere la utilización de equipos potentes capaces de transmitir un elevado valor de energía, sobre todo teniendo en cuenta los fuertes espesores usuales en las capas recicladas con cemento.

#### **2.5.7. Refino y nivelación**

Aunque con la maquinaria actual de reciclado se puede conseguir una regularidad superficial aceptable, no se debe adjudicar a estos equipos la responsabilidad de lograr la rasante definitiva si la rasante existente requiere modificaciones o es necesario recuperar el bombeo o los peraltes. En estos casos se debe proceder, antes de iniciar el reciclado, al extendido de un material granular (zahorra, preferentemente) con el que se obtenga la rasante y peraltes definitivos. No hay que olvidar que los defectos que se mantengan en la capa reciclada se deben suplir con la capa superior de mezcla bituminosa, mucho más cara y cuyo espesor medio se incrementa al aumentar las irregularidades, a fin de conservar en cualquier punto las rasantes previamente definidas y los espesores mínimos previstos en el proyecto.

No obstante, con el objetivo de recuperar y mejorar la rasante afectada por los equipos de reciclado, conviene realizar un refino con motoniveladora y una primera compactación que afecte al fondo de la capa y que alcance hasta una densidad de al menos el 90 - 92% de la máxima Proctor modificado.



**Figura 30.** Refino y nivelación con motoniveladora

**Fuente.** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de Firmes In-Situ con Cemento

### **2.5.8. Extensión del riego de curado o de protección**

Una vez terminada la compactación final, y con el menor desfase posible, se debe proceder al curado de la capa reciclada con el objetivo de proteger al material de la intemperie, de la evaporación del agua y del tráfico.

Normalmente, se recurre para ello a un riego con emulsión bituminosa de rotura rápida con una dotación mínima de betún residual de 300 g/m<sup>2</sup>, que se protege con la extensión de gravilla limpia y seca 3/6 (de una dotación comprendida entre 4 y 6 l/m<sup>2</sup> y ligeramente incrustada con una pasada de rodillo), en caso de que el tráfico vaya a circular sobre el mismo. Si este es importante, puede ser incluso aconsejable la extensión de un tratamiento superficial monocapa que además evite la clásica rotura de lunas.

El curado es una operación que, no por sencilla, resulta menos importante que las demás, pues hay que dejar a la losa reciclada madurar y endurecerse. Como no se suele disponer en todas las obras de una cuba regadora de emulsión para el curado inmediato de la capa reciclada, sino que en el mejor de los casos suele aparecer al final de la mañana y al terminar la jornada, se debe prever la disposición en obra de un equipo pulverizador de agua (pero que pulverice agua, no que encharque), capaz de mantener la superficie húmeda, con el fin de que no se produzcan secados superficiales (aunque no haya sol, ni viento). Este equipo debe ser independiente de la cuba necesaria para el suministro de agua que requiere el equipo reciclador, de manera que en todo momento esté asegurado el curado con agua de la superficie reciclada con cemento. Este equipo puede además emplearse en los casos de excesiva sequedad superficial que no permita una correcta compactación del material. Solo en el caso de obras muy pequeñas, se puede emplear un equipo manual.



**Figura 31.** Curado con agua y lanzade emulsión de una pequeña superficie  
**Fuente:** Jesús Díaz Minguela y Miguel López Bachiller, (2018), Reciclado de Firmes In-Situ con Cemento

## 2.6. Agentes estabilizadores

### 2.6.1. Cemento Portland

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

Se le conoce también como “cemento hidráulico”, porque tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reacciona químicamente con ella y forma un material de excelentes propiedades aglutinantes.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo

- ✓ 64% Óxido de calcio
- ✓ 21% Óxido de silicio
- ✓ 5,5% Óxido de aluminio
- ✓ 4,5% Óxido de hierro
- ✓ 2,4% Óxido de magnesio
- ✓ 1,6% Óxido de sulfatos
- ✓ 1% otros materiales, entre los cuales principalmente agua

#### 2.6.1.1. Tipos y clases de Cemento Comerciales en Bolivia

En nuestro medio, el cemento comúnmente utilizado es el de resistencia de 30 MPa, conocido como Cemento Estándar, hoy en día también se emplea el cemento especial de 40 MPa. Ambos cementos llevan el sello de calidad de IBNORCA. NB-011 - 95

Los cementos se diferencian por su composición y características particulares.

Cemento Portland es el producto obtenido por la pulverización del clinker Portland con la adición de piedra de yeso natural, se admite la adición de otros productos que no excedan del 1% en peso total, siempre y cuando los cementos resultantes cumplan las condiciones físicas, químicas y mecánicas requeridas.

**Tabla 4.** Tipos de cemento comerciales en Bolivia

<b>COBOCE</b>	<b>EL PUENTE</b>	<b>EMISA</b>	<b>VIACHA</b>
Producción-Cochabamba	Producción-Tarija	Producción-Oruro	Producción-La Paz
			
<b>WARNES</b>	<b>FANCESA</b>	<b>CAMBA</b>	<b>ECEBOL</b>
Producción-Santa Cruz	Producción-Sucre	Producción-Santa Cruz	Producción-Oruro
			

Fuente: Elaboración propia

**2.6.1.2. Propiedades del cemento**

Las principales propiedades fisicoquímicas del cemento son las siguientes

✓ **Finura:** Es una de las propiedades más importantes del cemento, ya que ella determina en gran medida la velocidad de hidratación, el desarrollo del calor de hidratación, la retracción y la adquisición de resistencia del cemento. Un cemento con grano fino se hidrata con mucha más facilidad.

✓ **Tiempo de fraguado:** Se usa para describir la rigidez de la pasta de cemento, es decir, determinar el cambio de estado fresco a estado endurecido. El fraguado inicial se define como el tiempo que transcurre desde el momento que la pasta de cemento recibe el agua y va

perdiendo fluidez hasta que no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura. El fraguado final es definido como el tiempo transcurrido hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable por cargas relativamente pequeñas, llegando a su temperatura máxima donde la pasta se vuelve dura.

✓ **Consistencia normal (Fluidez):** Es la característica que indica el grado de fluidez con que se puede manejar la pasta de cemento, este parámetro se determina con la aguja de Vicat. Existe una fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua, y es lo que se denomina consistencia normal.

Se limpia y se seca cuidadosamente la superficie de la mesa de flujo y se coloca el molde de flujo en el centro, colocar una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor y apisonar 20 veces. La presión del apisonador debe ser la suficiente para asegurar un llenado uniforme del molde. Se retira el mortero sobrante para obtener una superficie plana, por medio del deslizamiento de la regla de enrase (sostenido de cerca y perpendicularmente al molde) con un movimiento de sierra a lo largo del borde superior del mismo. Se limpia y se seca la plataforma teniendo especial cuidado de retirar el agua del borde del molde. Se levanta el molde del mortero un minuto después de completar la operación de mezclado. Inmediatamente después se deja caer la mesa 25 veces durante 15s, a menos que otra condición sea especificada.

✓ **Resistencia mecánica:** En cubos con aristas de 5,08 cm, se elaboran con una mezcla de una porción de cemento por 3 porciones de arena de OTAWA, que se ha adoptado como la de mayor aceptación según la ASTM. Se elaboran 8 cubos para ensayarlos por pares a un día, 3 días, 7 días y 28 días. Lo anterior para hacer un seguimiento apropiado de la evolución de las resistencias cumpliendo con las normas.

✓ **Calor de hidratación:** Se genera por la reacción entre el cemento y el agua. La cantidad de calor generado depende, primariamente, de la composición química del cemento, siendo carbonato tricálcico y el silicato tricálcico, los compuestos más importantes para la evolución de calor. La relación agua - cemento, finura del cemento y temperatura de curado también son factores que intervienen. Un aumento de la finura, del contenido de cemento y de la temperatura de curado aumentan el calor de hidratación.

### 2.6.2. HITEC-NovoCrete

Es un aditivo de estabilización del suelo que aumenta la resistencia de las infraestructuras como carreteras, autopistas, líneas ferroviarias, pistas y parques industriales, creando una



membrana impermeable y lo que es aún más importante una base flexible que limita significativamente la aparición de grietas y baches, con lo cual se reducen los costos continuos de mantenimiento de manera considerable.

La tecnología aumenta la resistencia de la base de la infraestructura creando una membrana impermeable y lo más importante una base flexible que limita la aparición de grietas y baches reduciendo significativamente el mantenimiento.

HITEC-NovoCrete es un polvo granulado blanquecino que se compone de elementos alcalinos y alcalinotérreos, apoya el proceso de hidratación del cemento. Uno de los propósitos es, aditivo de cemento para la *estabilidad de suelo*, fabricado en Alemania, el cual se utiliza como un aditivo no tóxico y no dañino para el **Cemento Portland tradicional** o los **aglomerantes hidráulicos** para carreteras en los procesos de estabilización de las capas base.

**Tabla 5.** Estabilización con Cemento Vs Estabilización con Cemento más el aditivo NovoCrete

Estabilización con cemento convencional	Estabilización con cemento convencional y NovoCrete
Después de un proceso de hidratación de 28 días, la contracción del cemento puede provocar agrietamiento considerable cuando el contenido de aglutinante es alto	Después del proceso de hidratación de 2 días, se establece una capacidad de carga. El proceso de hidratación total tarda aproximadamente 90 días sin agrietamiento y con una capacidad de carga
Durante el proceso de hidratación, solo se forman cristales cortos, que no permiten altas capacidades de carga	Durante el proceso de hidratación se forman estructuras de cristal alargadas que permiten capacidades de carga
Las capas estabilizadas permiten que el agua penetre particularmente en grieta y suelos de granos gruesos. Lo cual es problemático cuando hay heladas	El agua no penetra, ni ningún otro líquido, en las capas estabilizadas esto ofrece seguridad contra la escarcha
Problemas con la solidificación de los suelos margosos o arcillosos que contienen altos niveles de azufre relacionados con un alto contenido de cemento	No hay problemas con los suelos margosos ni arcillosos que contienen altos niveles de azufre relacionados con un alto contenido de cemento
No se pueden estabilizar los suelos con altos niveles de sal	Los suelos con altos niveles de sal pueden estabilizarse
Sin una capa de rodadura, las superficies estabilizadas convencionalmente pueden mostrar indicios de daños por deshielo y cambios en las condiciones en el transcurso de un año	No hay problemas con la escarcha, el deshielo ni los cambios en las condiciones climáticas porque las capas base resistentes al agua podrían estar construidas incluso desde los suelos del lugar

**Fuente:** Elaboración propia

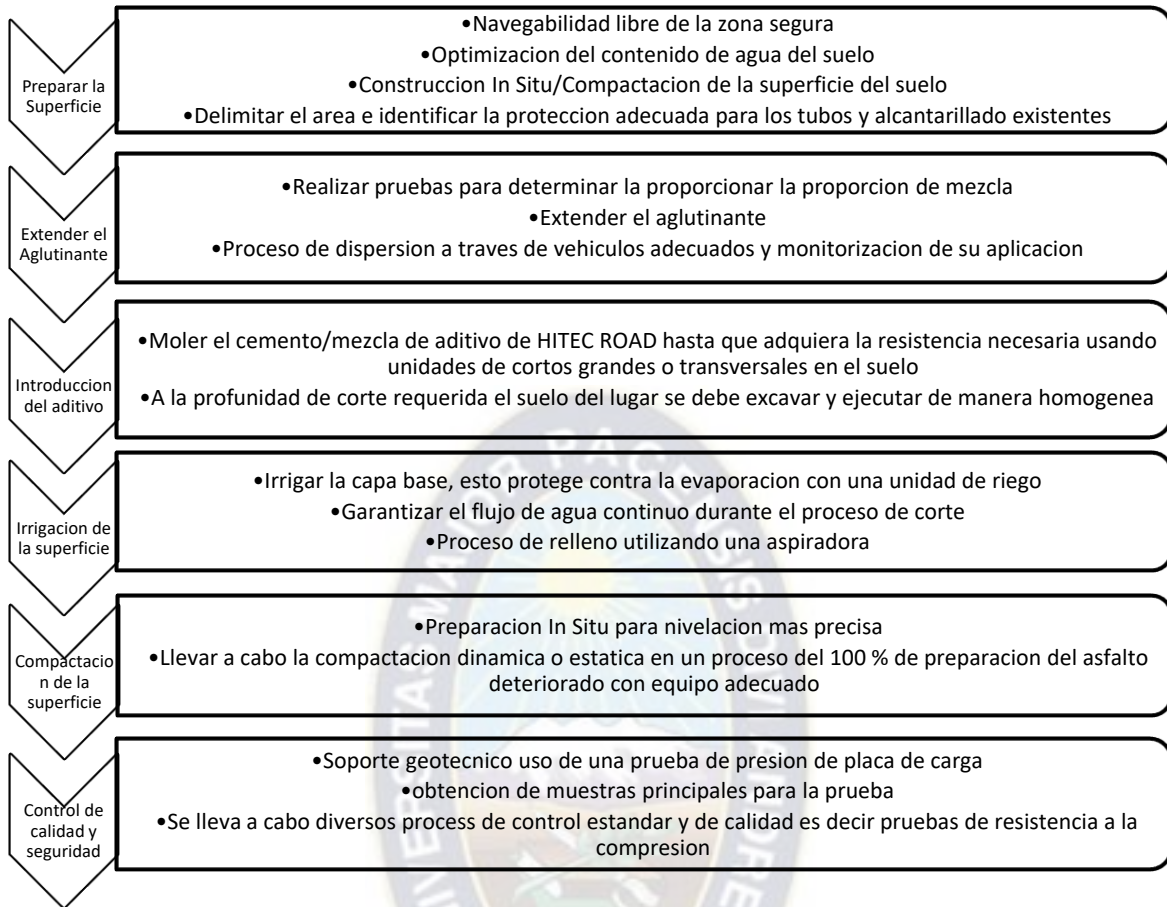
La composición del producto es una mezcla de minerales alcalinos y alcalinotérreos naturales y contiene los siguientes parámetros.

- ✓ Cloruro: aprox. 20 – 30 %
- ✓ Óxido: aprox. 10 – 15 %
- ✓ Sulfato: aprox. 5 – 10 %
- ✓ Silicato: aprox. 5 – 10 %
- ✓ Carbonato: aprox. 45 – 55%

El aditivo, ya sea solo o como una mezcla preparada (con cemento), se puede aplicar con control mecánico (con unidades esparcidoras especiales, que son adecuadas para la aplicación de pequeñas cantidades de aglomerante) o se puede esparcir de manera manual.

- ✓ Si se planea esparcir manualmente, se recomienda esparcir el aditivo sobre el cemento previamente esparcido.
- ✓ Con aplicación a máquina, se recomienda aplicar primero el aditivo y luego el cemento.

Si existen zonas de encharcamiento importantes en la obra, se recomienda aplicar el aditivo en forma de sándwich (cemento-aditivo (HITEC-NovoCrete)-cemento). Esta última variante también se puede repartir en el caso de eventos de lluvia esperados y/o en el caso de cantidades de cemento superiores (> 180 kg/m<sup>3</sup>).



**Figura 32:** Preparación de la superficie para la utilización del aditivo

**Fuente:** (2020), HITEC-NovoCrete

HITEC-NovoCrete debe agregarse al cemento o al ligante hidráulico para carreteras con una proporción del 2 % (calculado sobre la cantidad de cemento / ligante hidráulico para carreteras utilizado) mezclado junto con el material del suelo in situ.

**Tabla 6.** Cantidad a añadir el aditivo respecto al cemento

TIPO DE SUELO PRINCIPAL	Contenido de Cemento o Ligante Hidráulico de Carreteras (kg/m <sup>3</sup> ) RANGO	HITEC-NovoCrete (%) (Calculado sobre la cantidad de cemento usado)
Grava o Arena-Grava-Mix	100 a 160	2
Arena	160 a 180	2
Franco Arenosa	170 a 190	2
Limo	180 a 200	2
Arcilla	180 a 220	2
Mezclas de áridos naturales y artificiales o materiales reciclados	100 a 160	2

**Fuente:** Elaboración propia

Requisitos para suelos naturales / mezclas de áridos o material de reciclaje a utilizar

- Pérdida de ignición < 15%
- Máx. Tamaño de grano permitido: 50 mm - Mínimo 20 % a 25 % < 0,2 mm
- Contenido de sulfato < 3000 ppm
- Contenido orgánico < 1,5 %

La experiencia ha demostrado que un contenido de HITEC-NovoCrete del 2 % es suficiente para la estabilización y/o la inmovilización, pero esta proporción puede ser, especialmente con respecto a los procesos de inmovilización o, si es necesario, hasta un máx. 4%.

**2.6.2.1. Ventajas de HITEC-NovoCrete**

Una de las ventajas, es medioambiental y especialmente económicas, no requieren excavación ni reemplazo de suelo de modo que el suelo existente se puede utilizar para el proceso de estabilización o reciclado, el tiempo de construcción se puede reducir significativamente en comparación con otras.

Las capas de base estabilizadas, tratadas solo con cemento, generalmente combinan una alta rigidez con un alto riesgo de agrietamiento prematuro. Esta combinación indeseable se consideró como una gran desventaja para las estabilizaciones con cemento convencional. Debido a la resistencia a la tracción y la flexibilidad generadas por las capas de HITEC-NovoCrete, es posible la absorción de vibraciones.



**Figura: 33:** Ventajas de HITEC-NovoCrete

**Fuente:** (2020), HITEC-NovoCrete

**2.6.2.2. Consideraciones para ensayos de laboratorio**

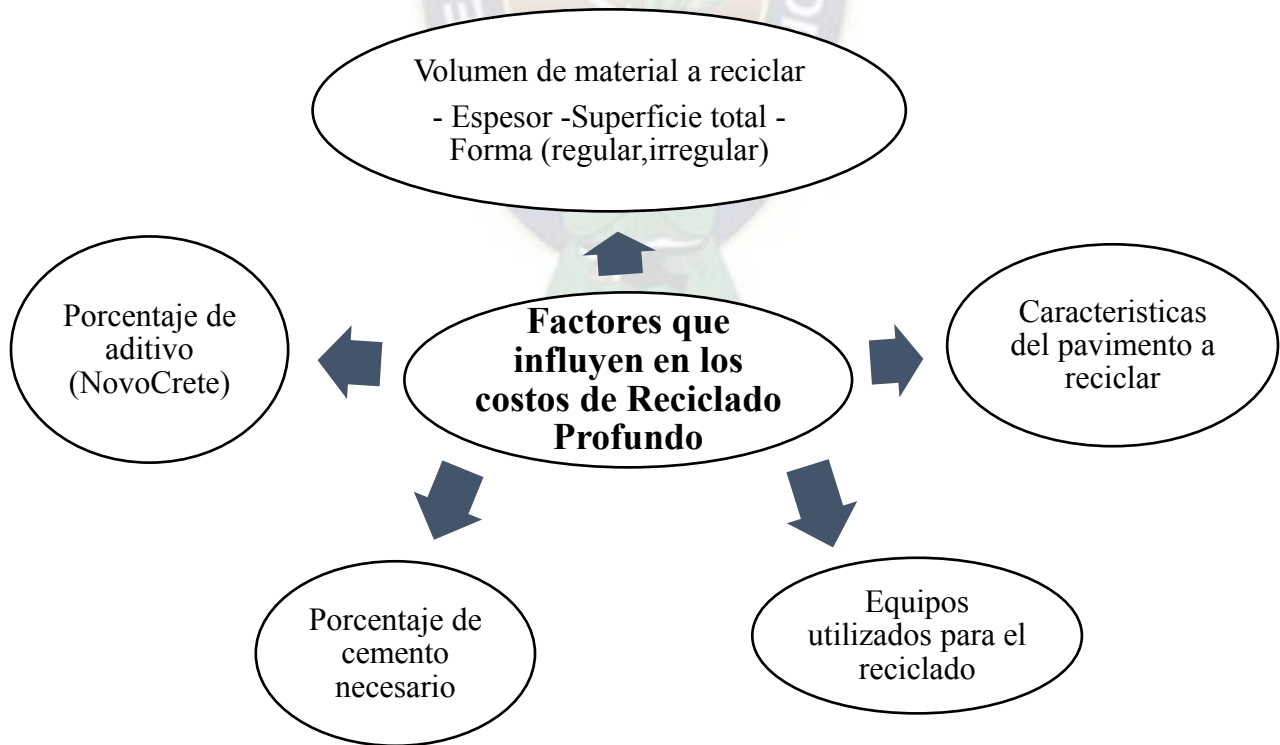
HITEC-NovoCrete genera un requisito de humedad mayor que en el proceso de estabilización, en el que solo se utilizan cemento o ligantes hidráulicos.

Por lo tanto, debe garantizarse que se aplicará el contenido de agua óptimo correcto del agente aglutinante, las siguientes pruebas geotécnicas y químicas deben llevarse a cabo como parte de los estudios de factibilidad

- ✓ Determinación de la distribución granulométrica (tamiz y/o hidrómetro).
- ✓ Determinación del contenido de agua natural.
- ✓ Determinación del límite líquido/plástico.
- ✓ Prueba Proctor (estándar o modificada: según los requisitos del proyecto).
- ✓ Resistencia a la compresión no confinada (en especímenes combinados después de 7 o 14 o 28 días de tiempo de curado)

**2.6.2.3. Factores que influyen en el estudio de costos**

En el caso de un reciclado profundo de pavimento con cemento y aditivo, los costos dependerán principalmente de los siguientes factores.



**Figura 34.** Principales factores para la realización de un reciclado profundo

**Fuente:** Elaboración propia

A la vista de todos estos factores, es fácil deducir que el coste de un reciclado puede variar de forma muy considerable de una obra a otra, en función, sobre todo, del volumen de material a reciclar y de las necesidades de los agentes estabilizantes.

**2.6.2.4. Proyectos de HITEC-NovoCrete**

La reconstrucción o reciclado de suelos mediante cemento es un método de construcción de eficacia comprobada que está adquiriendo cada vez mayor relevancia comercial. Este sistema siempre se ha basado en investigaciones y normativas.

El sistema NovoCrete está diseñado para suelos en el ámbito de proyectos de reciclado, ofreciendo ventajas técnicas con respecto a los métodos de construcción tradicionales.



**Figura 35:** Tecnología avanzada – Construyendo el Futuro HITEC-NovoCrete

**Fuente:** Elaboración Propia

**2.7. Especificaciones técnicas Invias (Instituto Nacional de Vial-Colombia)**

**Suelos-Cemento – ARTÍCULO 350-13**

Este trabajo consiste en la construcción de una capa estructural de pavimento constituida por una mezcla uniforme de suelo.

**2.7.1. Materiales**

Los ensayos de caracterización para cumplir con los requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento se utilizará los establecidos por el Instituto Nacional de Vías mostrados a continuación.

✓ **Suelo o agregados por estabilizar**

El material ya combinado deberá estar libre de material orgánico u otras sustancias que pueda perjudicar el correcto fraguado del cemento. Deberá además cumplir los requisitos generales que se muestra a continuación

**Tabla 7.** Requerimientos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento

Característica	Norma de Ensayo INV	Gradación	
		tipo A	tipo B
Granulometría del material pulverizado, liso para estabilizar	E-123	Tabla 19	
Tamaño máximo, fracción máxima del espesor de la capa compactada		1/2	

**Fuente:** Suelos cemento – ARTÍCULO 350-13

Se deberá ajustar a alguna de las franjas granulométricas que se muestran a continuación

**Tabla 8.** Requerimientos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm/ U.S. Standard)								
	50,0 2"	37,5 1 1/2"	25,0 1"	19,0 3/4"	9,5 3/8"	4,75 No. 4	2,00 No. 10	0,425 No. 40	0,075 No. 200
	% PASA								
TIPO A A-50 A-25	100	70-100	60-100	50-90	40-80	30-70	20-55	10-40	2-20
			100	70-100	60-100	50-85	40-70	20-45	2-25
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0%	7%				6%			3%
TIPO B B-50-1 B-50-2	100	-	-	-	-	40-80	-	-	2-355
	100	-	-	-	-	60-100	-	-	0-50

<b>Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)</b>	0%	-	8%	5%
------------------------------------------------------------------	----	---	----	----

Fuente: Suelos cemento – ARTÍCULO 350-13

**Tabla 9.** Requerimientos del material para la construcción de suelo-cemento

Característica	Norma de Ensayo INV	Limitación tipo A	Limitación tipo B
Límite líquido, % máximo	E-125	30	35
Índice de plasticidad, % máximo	E-125 y E-126	12	15
Contenido de material orgánica, % máximo	E-121	1,0	

Fuente: Suelos cemento – ARTÍCULO 350-13

La mezcla de suelo-cemento se diseñará mediante los criterios de durabilidad y resistencia indicados a continuación

**Tabla 10.** Criterios de durabilidad para mezclas suelo cemento

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	SC-D	SC-R
Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado, %	E-612		
Suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A-3			14
Suelos A-2-6; A-2-7; A-4; A-5			10
Suelos A-6; A-7			7

Fuente: Suelos cemento – ARTÍCULO 350-13

**Tabla 11.** Criterios de resistencia para mezclas suelo cemento

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	SC-D	SC-R
Comportamiento de la resistencia con			
• Incremento en el contenido de cemento	E-614		Crece
• Incremento de la edad			Crece
Resistencia a la compresión a 7 días, MPa			
• MÍNIMA	E-614	NOTA	2,1
• MÁXIMA		4,5	4,5

Fuente: Suelos cemento – ARTÍCULO 350-13

Nota: La resistencia mínima será la que se obtenga en la mezcla de diseño que cumpla con el criterio de durabilidad

✓ **Cemento**

El cemento para la estabilización deberá ser cemento hidráulico de uso general.



No se permitirá el empleo de cemento que haya fraguado parcialmente o que contenga terrones del producto endurecido. Tampoco se permitirá el empleo de cemento extraído de bolsas usadas en jornadas anteriores.

✓ **Agua**

El agua que se requiera para la estabilización deberá ser limpia y libre de material orgánico, álcalis y otras sustancias perjudiciales

✓ **Aditivos**

El uso de aditivo está permitido para obtener la trabajabilidad adecuada o mejorar las características de la mezcla

**2.7.2. Equipo**

El equipo estará constituido por equipos para la escarificación y la disgregación del material (si se requiere), la elaboración de la mezcla (planta de mezcla o máquina estabilizadora), compactadores metálicos vibratorios y neumáticos, carrotaques para aplicar agua y el material de curado de la capa compactada, equipo para la formación de las juntas, equipo de transporte y herramientas menores.

**2.7.3. Fórmula de trabajo**

Dentro de la franja granulométrica elegida, el constructor propondrá al interventor una "Fórmula de Trabajo" a la cual se deberá ajustar durante la construcción de la capa, con las tolerancias que se indican.

- La granulometría del material
- El tipo y la marca de cemento empleada en el diseño
- El tipo y la marca de los aditivos empleados en el diseño
- El contenido óptimo de cemento
- El valor de pérdidas por durabilidad
- El valor de resistencia a la compresión a los 7 días
- Los porcentajes óptimos de agua para mezcla y compactación

La fórmula de trabajo establecida en el laboratorio se podrá ajustar con los resultados de las pruebas realizadas durante la fase de experimentación

Si durante la ejecución de las obras varía la procedencia de alguno de los componentes de la mezcla o la curva granulométrica incumple las tolerancias que se indica, se requerirá el estudio de una nueva fórmula de trabajo.

## 2.8. Especificaciones técnicas ABC (Administradora Boliviana de Carreteras)

### Estabilización con cemento (MÉTODO PCA)

Existen varias metodologías para el diseño y dimensionamiento del suelo – cemento, a continuación, se describirá la metodología desarrollada por la Portland Cement Association (PCA). La PCA dispone de una Norma General y una Simplificada de Dosificación.

#### 2.8.1. Revestimiento bituminoso

Las bases de suelo-cemento se deben recubrir con una emulsión asfáltica para evitar pérdidas de humedad, curado y como protección momentánea a la abrasión, hasta colocar encima la correspondiente carpeta de rodadura.

#### 2.8.2. El espesor de la capa bituminosa

Dependerá de muchos factores: el tipo de superficie, el volumen y composición del tráfico, las condiciones climáticas, la disponibilidad de materiales, y las prácticas locales. La Tabla 12 está basada en la experiencia cubriendo un amplio rango de estas variables y muestra el espesor de superficie recomendado como una buena práctica de diseño. Bajo condiciones favorables indicadas por experiencias locales previas, o cuando se espera que las superficies serán selladas y posiblemente recapadas en un lapso relativamente corto.

**Tabla 12.** Espesores del revestimiento bituminoso

Espesor de suelo-cemento(cm)	Espesor recomendado de revestimiento bituminoso(cm)	Espesor mínimo de revestimiento bituminoso(cm)	
		Área sin congelamiento	Área sin congelamiento
13 – 15	2 – 3	TSS*	TSD
18	3 – 5	TSD*	2,5
20	5 – 6	2,5	3,0
23	6 – 7,5	5,0	5,0

**Fuente:** Thickness Design for Soil-Cement Pavements-PCA/Diseño de espesores para pavimentos de suelo – cemento – PCA

#### 2.8.3. DOSIFICACIÓN DEL SUELO – CEMENTO

A continuación, se describen los métodos de ensayo para la dosificación del suelo – cemento, propuestas por el Portland Cement Association PCA.

La manera en que un suelo en particular reacciona con el cemento puede ser determinado por ensayos de laboratorios simples realizados a mezclas de cemento con el suelo. La cantidad de ensayos que se requieren depende de los requisitos de la construcción, de los diferentes tipos de suelo del proyecto y el tamaño del proyecto. Cualquiera sea la magnitud del proyecto, los laboratorios deben determinar tres requisitos fundamentales para el suelo – cemento.

1. La cantidad de cemento suficiente para producir un material con *resistencia* y *durabilidad* adecuada para la pavimentación.
2. La cantidad de agua que debe incorporarse a la mezcla
3. A que densidad debe ser compactada la mezcla de suelo-cemento.

La normativa establecida por el PCA, se basa en los procedimientos de ensayo de la ASTM–AASHTO:

1. Relaciones humedad-peso unitario de mezclas de suelo cemento (ASTM D558-AASHTO T134)
2. Humedecimiento y secado de mezclas de suelo cemento compactadas (ASTM D559 AASHTO T135)
3. Congelamiento y deshielo de mezclas de suelo cemento compactadas (ASTM D560 AASHTO T136).

El ensayo de durabilidad por congelamiento y deshielo no requiere ser ejecutado en regiones donde este efecto ambiental tenga peso considerable.

La PCA, basada en la correlación estadística obtenida en los resultados de ensayos de durabilidad y resistencia a compresión simple a los 7 días. El fundamento de este método, comprobado por los ensayos realizados, es la constatación de que un suelo arenoso, con determinada granulometría y peso específico seco máximo aparente, requerirá, de acuerdo con el criterio de pérdida de peso en el ensayo de durabilidad, la misma cantidad de cemento para este indicado, desde que alcance resistencia a compresión, a los 7 días, superior a un cierto valor mínimo establecido estadísticamente en la serie de ensayos de comparación realizada.

#### **2.8.4. Norma General de Dosificación**

La PCA explica, en su publicación Soil-cement Laboratory Handbook, que el principal requisito de un suelo – cemento es resistir las variaciones de las condiciones climáticas. Resistencia es otro requisito importante, sin embargo, mezclas de suelo-cemento que resisten las variaciones de las condiciones climáticas también presentan adecuada resistencia. De este modo, el elemento

básico del suelo – cemento es la cantidad de cemento requerida para producir una mezcla que resista los esfuerzos producidos en los ensayos de durabilidad por mojado y secado. El segundo requisito más importante, es la economía. *En general, 85% de los diferentes tipos de suelo pueden ser estabilizados adecuadamente con la adición de 14% o menos de cemento, no requiriéndose mayores ensayos para determinar esta cantidad. Sin embargo, más del 50% de estos suelos pueden estabilizarse con menos del 10% de adición de cemento, por lo que es importante que se realicen los ensayos necesarios para determinar la menor cantidad, por lo tanto, el menor costo, con el cual un suelo en particular puede ser estabilizado.*

**a) Estimación de la cantidad de cemento para realizar los ensayos**

En materiales arenosos, pobremente graduados, faltos de limo y arcilla, los cuales requieren mayor cantidad de cemento que suelos arenosos que contienen cierta cantidad de limo y arcilla.

La tabla 13 indica la cantidad de cemento requerida para los diferentes tipos de suelo clasificados de acuerdo a la AASHTO (M145). Estas cantidades de cemento pueden utilizarse como datos preliminares que posteriormente serán modificados o verificados como resultado de los ensayos a realizarse.

**Tabla 13.** Cantidades de cemento por tipo de suelo de acuerdo a la clasificación de la AASHTO

Clasificación de suelo según AASHTO (M 145)	Rango usual de cemento requerido EN PESO (%)	Cantidad de cemento estimada para realizar el ensayo de humedecimiento y secado EN PESO (%)
A-1-a	3 - 5	5
A-1-b	5 - 8	6
A-2	5 - 9	7
A-3	7 - 11	9
A-4	7 - 12	10
A-5	8 - 13	10
A-6	9 - 15	12
A-7	10 - 16	13

**Fuente:** Thickness Design for Soil-Cement Pavements-PCA/Diseño de espesores para pavimentos de suelo – cement - PCA

**b) Determinación de las relaciones de humedad – peso unitario para el suelo cemento**

En general se ensayan muestras con tres cantidades de cemento, diferenciando la cantidad mediante dos puntos porcentuales dependiendo del tipo de suelo a ser analizado y sobre la base de las cantidades propuesta en la Tabla 13. Dado que los resultados del ensayo de compactación varían muy poco para pequeñas diferencias en la cantidad de cemento, un único ensayo de

compactación puede ser realizado con la cantidad media entre las previstas, adoptándose los resultados de compactación como válidos para las tres cantidades escogidas.

El ensayo se diferencia para dos tipos de materiales:

1. Suelos que contienen material retenido en el tamiz de 4,75 mm (Nº 4) (Método B)
2. Suelos que no contienen material retenido en el tamiz de 4,75 mm (Nº 4) (Método A)

El desarrollo del ensayo de “Relaciones humedad-peso unitario en mezclas de suelo cemento (ASTM D558-AASHTO T134)”, Método A y B, se encuentran descritos en detalle en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales – Suelos de la Administradora Boliviana de Carreteras Sección SO7 Estabilización de suelos con mezclas de suelo – cemento, ensayo S0705.

**c) Ensayo de Humedecimiento y secado de mezclas de suelo cemento compactadas (ASTM D559 - AASHTO T135)**

Una vez determinado el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima de la mezcla de suelo cemento, el siguiente paso es el moldeado de probetas para ejecutar el ensayo de Humedecimiento y secado ASTM D559 y *Congelamiento y Deshielo ASTM D560*. Como se indicó anteriormente, el ensayo ASTM D560 solo es necesario cuando el proyecto va a estar sometido a condiciones ambientales que justifiquen la realización del ensayo.

Estos ensayos determinan la cantidad mínima de cemento requerida para estabilizar, adecuadamente, el suelo ensayado. Las probetas son empleadas con el contenido óptimo de humedad determinado mediante el ensayo ASTM D558 y con el mismo equipo. Por lo tanto, la densidad de los especímenes será comparable a la densidad máxima obtenida en el ensayo de humedad-peso unitario y a la densidad que se obtendrá en la construcción.

Al igual que en ensayo anterior, tanto el moldeado de las probetas como la ejecución del ensayo deben ser diferenciados para suelos que contienen material retenido en el tamiz Nº 4 y los que no contienen.

El desarrollo del ensayo de “Humedecimiento y secado de mezclas de suelo cemento compactadas (ASTM D559-AASHTO T135)”, Método A y B, se encuentran descritos en detalle en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales – Suelos de la Administradora Boliviana de Carreteras Sección SO7 Estabilización de suelos con mezclas de suelo – cemento, ensayo S0706.

#### **d) Otros ensayos complementarios**

A fin de obtener mayor información del comportamiento de los suelos estabilizados con cemento, pueden realizarse otros ensayos tales como los de Resistencia a la Compresión no confinada (ASTM D 1632 y ASTM D 1633). El ensayo de resistencia a la compresión permite conocer el ritmo de endurecimiento y comportamiento de la mezcla en el tiempo.

El esfuerzo a la compresión a los 7 días, de muestras saturadas de suelo-cemento durables, varía dependiendo de las propiedades físicas y químicas del suelo y se encontrarán por lo general entre los 2065 kPa (300 psi) y 5500 kPa (800 psi).

El desarrollo del ensayo de "Preparación en el laboratorio de probetas de suelo cemento (ASTM D1632)" y "Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento (ASTM D1633)", se encuentran descritos en detalle en el Manual de Ensayos de Suelos y Materiales – Suelos de la Administradora Boliviana de Carreteras Sección SO7 Estabilización de suelos con mezclas de suelo – cemento, ensayos S0707 y S0708 respectivamente.

#### **e) Determinación de la cantidad de cemento**

Tal como lo indica la PCA en el documento Soil – Cement Laboratory Handbook, el principal requisito de un suelo – cemento es resistir las variaciones de las condiciones climáticas. De este modo, el elemento base de comparación del suelo – cemento, es la cantidad de cemento requerida para producir una mezcla que resista los esfuerzos inducidos en los ensayos de durabilidad por humedecimiento y secado. La observación de proyectos ejecutados prueba que se puede tener confianza tanto en los resultados basados en estos ensayos, como en el criterio que se da a continuación.

El siguiente criterio está basado en un considerable número de resultados de laboratorio, en el comportamiento de muchos trabajos ejecutados y en el uso de información obtenida, de diversas fuentes, de varios miles de probetas de ensayo. El uso de este criterio permitirá determinar la cantidad de cemento requerida para producir un suelo – cemento resistente y durable, aceptable como base de pavimento de la más alta calidad.

Será adoptada como cantidad de cemento en peso, la menor de las cantidades con las cuales las probetas ensayadas satisfagan el siguiente requisito:

1. La pérdida de peso de las probetas después de 12 ciclos de ensayo de Humedecimiento - secado, no sean superiores a los siguientes límites:

Suelos A1, A-2-4, A-2-5 y A-3 14 %

Suelos A-2-6, A-2-7, A-4 y A-5 10 %

Suelos A-6 y A-7 7 %

2. El esfuerzo de compresión deberá incrementarse tanto con la edad, como con la cantidad de cemento en los rangos de contenido de cemento que cumplan con los requisitos del punto 1.

Ese criterio no debe ser considerado como una recomendación irrevocable, más bien como un principio que puede ser considerado satisfactorio en el estado actual de los conocimientos que se tienen de suelo – cemento.

### **2.8.5. Norma Simplificada de Dosificación**

La Norma Simplificada de Dosificación permite eliminar alguno de los ensayos con la utilización de ábacos.

Los ensayos requeridos son: clasificación del suelo, ensayo de humedecimiento – secado y resistencia a la compresión.

La Norma Simplificada de Dosificación se divide en dos métodos distintos: Método A para suelos que no contienen material retenido en el tamiz N° 4 y Método B para suelos que contienen material retenido en el tamiz N° 4.

El uso del método se restringe a suelos que contengan menos del 50 % de material con diámetro equivalente inferior a 0,05 mm (limo y arcilla), menos del 20 % de material con diámetro equivalente inferior a 0,005 mm (arcilla) y menos de 45% de material retenido en el tamiz N° 4. Este procedimiento no puede ser utilizado con suelos granulares que contienen material retenido en el tamiz N° 4 cuya gravedad específica suelta (ASTM D2726) sea menor a 2,45.

La Norma Simplificada no siempre indica la cantidad mínima de cemento que puede ser utilizada para un suelo arenoso en particular, sin embargo, siempre permite obtener una cantidad de cemento segura, muy próxima a la que se obtendrían con la Norma General de Dosificación.

## CAPITULO III

### 3. MARCO PRÁCTICO

#### 3.1. Metodología

La descripción de los procedimientos y métodos empleados en este proyecto de grado serán en lo posible los más completos y claros, de manera que otro investigador pueda entender de manera fácil y sencilla el trabajo efectuado, con ayuda bibliográfica como fuente de información.

Con el fin de cumplir adecuadamente los objetivos de este proyecto de grado, es conveniente seguir la siguiente metodología.

- Muestreo y transporte de material
- Ensayos de laboratorio (procedimientos realizados)

La cual fue puesta en práctica en los laboratorios de la Empresa Municipal de Asfaltos y Vías (EMAVIAS), tomando en cuenta la información recopilada del tramo carretero Coto-ca-Cuatro Cañadas MALLA 1 y de material bibliográfico.

##### 3.1.1. Muestreo y transporte del material

La extracción de la muestra fue del tramo de rehabilitación de la carretera SANTA CRUZ TRINIDAD MALLA 1: COTOCA - CUATRO CAÑADAS, de la progresiva Km 34+520.



**Figura 36.** Ubicación de muestra de material COTOCA – CUATRO CAÑADAS  
Fuente: Google Earth





**Figura 37.** Despacho de material triturado hacia Cotoca  
**Fuente:** Elaboración propia

Durante la investigación, se obtuvo una muestra de reciclado de la progresiva Km 34+520 del tramo. Obteniendo 12 sacos de 60 kilos cada uno, teniendo un total de 720 kilos de material, el cual se utilizó para realizar los diferentes ensayos en laboratorio.

La muestra fue trasladada en bolsas plásticas y sacos de tal manera que se evite la pérdida o contaminación del material



**Figura 38.** Sacos de material para el traslado a EMAVIAS  
**Fuente:** Elaboración propia

La toma de muestras fue lo más representativa posible. De manera que la muestra no sufra deterioro, que puedan inducir errores en los resultados obtenidos.

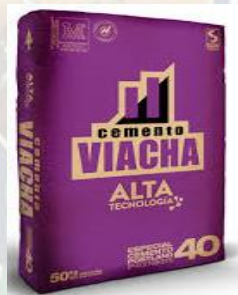
El aditivo que se utilizó es el NovoCrete el cual fue proporcionado por la empresa HITEC.

HITEC-NovoCrete debe agregarse al cemento o al ligante hidráulico para carreteras con una proporción del 2 % (calculado sobre la cantidad de cemento / ligante hidráulico para carreteras) mezclado junto con el material del suelo in situ.



**Figura 39.** Aditivo NovoCrete  
**Fuente:** HITE R ROAD-NovoCrete

Para la utilización del cemento, se empleó el cemento Portland 1P-40 con resistencia a la compresión de 40MPa a los 28 días. El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que una vez endurecida conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.



**Figura 40.** Cemento Portland IP-40  
**Fuente:** Cemento Portland Viacha-Constructor Bolivia

### **3.1.2. Ensayos de laboratorio (procedimientos realizados) – Características Física-Mecánica de Suelo Reciclado**

Para el presente proyecto se realizó la ejecución de ensayos en laboratorio, siguiendo especificaciones técnicas y normativas.

Los estudios de caracterización son los que ayudan a conocer y detectar el comportamiento en estado natural antes de realizar los diferentes ensayos.

La caracterización física-mecánica consiste en el análisis experimental de ensayos normalizados de laboratorio mostrados a continuación.

### 3.1.2.1. Contenido de humedad

Se realizó el ensayo de contenido de humedad (ASTM D2216).

#### ➤ Procedimiento realizado en laboratorio

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 41.** Contenido de Humedad  
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la secuencia de imágenes, la primera imagen muestra el registro del peso de recipiente vacío y limpio (WC), la siguiente imagen es la muestra húmeda mayor a 2500 gramos (la cantidad de la muestra de suelo depende del método a usar), seguido se observa el recipiente más la muestra en el horno a una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C, finalmente se registra el peso del recipiente más la muestra seca.

### 3.1.2.2. Análisis granulométrico por tamizado

Se realizó el ensayo de análisis granulométrico por tamizado (AASHTO T27-93 y ASTM D422-63).

#### ➤ Procedimiento realizado en laboratorio

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 42.** Análisis Granulométrico  
Fuente: Elaboración propia

La cantidad de muestra requerida dependerá del tamaño máximo de partículas. La primera imagen muestra el cuarteo del material, seguido se debe seleccionar material, grueso y registrar el

peso retenido en cada malla. Con el suelo fino pasante el tamiz No10 se extraerá 100g el cual dejar remojar, lavar a través del tamiz No200 hasta que el agua quede limpia, llevar al horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 16 horas o hasta peso constante y posteriormente pasar la serie fina y registrar los pesos retenidos.

### 3.1.2.3. Límites de Atterberg

Se realizó el ensayo de límite líquido y límite plástico (AASHTO T90-70, ASTM D423-66 y ASTM D424-59).

#### ➤ Procedimiento realizado en laboratorio

##### — Límite líquido

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 43.** Límites de Atterberg  
**Fuente:** Elaboración propia

Para este ensayo la muestra se prepara un día antes, como se puede observar en la secuencia de imágenes, la primera imagen muestra la preparación del material pasante No40 más agua, la muestra tendrá humedad y se deja reposando durante 16 horas.

La tercera imagen muestra el aparato de límite líquido de Casagrande, posteriormente la muestra preparada se coloca en la copa de casa grande hasta una profundidad aproximadamente de 10mm, seguido se deberá girar la manivela del aparato, finalmente se observa las dos mitades entran en contacto a una distancia de 13mm.

Deberá entrar en tres rangos de golpes, entre 25 a 35 golpes, 20 a 30 golpes y 15 a 25 golpes, obteniendo el contenido de humedad en cada rango de golpes.

##### — Límite plástico

Colocar sobre la placa de vidrio 20 gramos de material y formar terrones elipsoidales, posteriormente enrollar la masa de suelo en la placa de vidrio hasta lograr un diámetro uniforme de 3,2 mm en dos minutos, seguido se lo coloca en un contenedor hasta alcanzar los 6g de suelo así pudiendo determinar el contenido de humedad.

**3.1.2.4. Límite de contracción (método de la parafina)**

Se realizó el ensayo de límite de contracción (ASTM D4943-18).

➤ **Procedimiento en laboratorio**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 44.** Límites de contracción y preparación de la muestra  
**Fuente:** Elaboración propia

La muestra a ensayar suelo pasante el tamiz No 10 con la adición de la misma cantidad de agua del ensayo límite líquido más el 10% de la misma, teniendo una muestra húmeda.

Como se observa en la secuencia de imágenes, la primera imagen se observa la determinación del peso recipiente de contracción y volumen del recipiente de contracción con el agua destilada sabiendo que la densidad del agua es igual a  $1 \text{ g/cm}^3$ , posteriormente la preparación de la muestra, seguido se deberá introducir el material al recipiente de contracción capa por capa hasta llenar por completo.



**Figura 45.** Límites de contracción y preparación con parafina  
**Fuente:** Elaboración propia

Se observan en la primera imagen las pastillas húmedas, las cuales se deberá secar al ambiente hasta un color claro, posteriormente llevar al horno hasta peso constante y tener una pastilla seca como se observa en la segunda imagen.

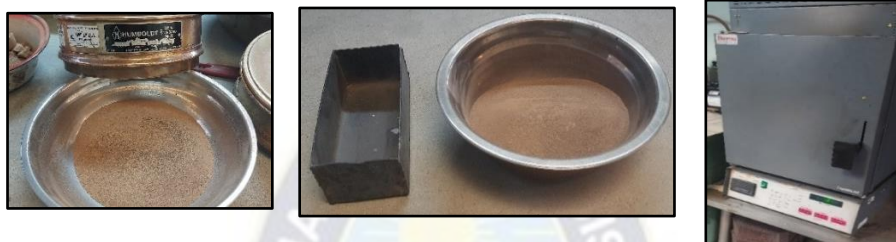
Introducir la parafina al horno a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  luego sumergir las pastillas secas en parafina y registrar el peso. Sumergir la pastilla seca cubierta con parafina y registrar el peso como se puede observar en las figuras.

### 3.1.2.5. *Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición*

Se realizó el ensayo de determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de Perdida por Ignición (INV E – 121-13 Y AASHTO T194).

➤ **Procedimiento en laboratorio**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 46.** Determinación del contenido orgánico  
**Fuente:** Elaboración propia

El material a utilizar es el pasante tamiz No10, se lleva al horno a un peso constante a  $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ , posteriormente se lleva al crisol aproximadamente 40 gramos, registrar el peso inicial antes de meter al horno de ignición, una vez registrado se lleva al horno de ignición durante 6 horas a  $445\pm 10^{\circ}\text{C}$ , así como se observa en la secuencia de imágenes, pasado el tiempo sacar del horno de ignición dejar enfriar para posteriormente determinar el peso del crisol más suelo seco.

Con los valores ya obtenidos se podrá determinar el contenido orgánico, el cual se expresará en porcentaje.

### 3.1.2.6. *Equivalente de arena*

Se realizó el ensayo de equivalente arena (AASHTO T176-79 y ASTM D2419-74).

➤ **Procedimiento en laboratorio**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 47.** Equivalente Arena, preparación de la muestra  
**Fuente:** Elaboración propia

La preparación de la muestra de suelo será el pasante del tamiz No 4, tomar una muestra representativa aproximadamente de 100g y meter al horno hasta peso constante como se ve en primera imagen. La preparación de la solución es 88-ml de solución concentrada con 3697ml de agua destilada. Llenar la solución a las probetas graduadas hasta 4", como se observa en las imágenes.



**Figura 48.** Lectura del Equivalente Arena  
**Fuente:** Elaboración propia

Se agita el conjunto produciendo 90 ciclos en 30 segundos, posteriormente limpiar con el irrigador hasta alcanzar las 15", dejar reposar durante 20min. Se le introduce el pistón evitando turbulencia y poder leer la altura del sedimento.

### 3.1.2.7. *Gravedad específica de las partículas sólidas*

Se realizó el ensayo de gravedad específica de las partículas sólidas (AASHTO T100-70 y ASTM D854-02).

#### ➤ **Procedimiento en laboratorio**

La muestra debe ser tamizada a través del tamiz No 4, tomando en cuenta la porción pasante. La cantidad de muestra dependerá del tipo de suelo.

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 49.** Calibración del Picnómetro y preparación de la muestra  
**Fuente:** Elaboración propia

Limpiar y secar el picnómetro para introducir agua destilada hasta la línea de referencia para llevar a baño maría a diferentes temperaturas durante 3 horas, pesar picnómetro más agua destilada (el conjunto debe estar limpio).



**Figura 50.** Gravedad Especifica  
**Fuente:** Elaboración propia

Pesar los picnómetros limpios y secos introducir agua destilada hasta 1/3 de la misma, introducir la muestra preparada con ayuda de un embudo, luego llenar hasta la línea de referencia con agua destilada, posteriormente introducir los picnómetros en agua maría a 25°C para poder sacar todo el aire atrapado. Una vez realizado este proceso, se pesará el picnómetro con agua destilada y más el suelo, como se puede observar en las imágenes.

### 3.1.2.8. *Peso específico de agregado grueso*

Se realizó el ensayo de peso específico de agregado grueso (ASTM C128).

#### ➤ **Procedimiento en laboratorio**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 51.** Peso Específico de Agregado grueso  
**Fuente:** Elaboración propia

La preparación de la muestra a ensayar se toma material retenido en la malla No4, el cual se lava y sumerge en agua durante 24 horas, pasado el tiempo secar superficialmente la muestra y



registrar el peso, posteriormente se introducirá al canastillo la muestra seca superficialmente sumergir el conjunto completo y registrar un nuevo peso total, como se observa en las imágenes.

### 3.1.2.9. *Relación soporte california CBR*

Se realizó el ensayo de relación soporte california CBR (AASHTO T193-03 y ASTM D1883-07).

#### ➤ **Procedimiento en laboratorio**

El ensayo se realizó según la norma especificada en el capítulo 2.

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 52.** Preparación de la muestra para el ensayo del C.B.R.

**Fuente:** Elaboración propia

Primeramente, preparar la muestra, compensando el material, mezclar de manera homogénea, posteriormente se le agrega agua en el porcentaje óptimo ya encontrado con el ensayo de relación densidad seca – humedad.



**Figura 53.** Lectura del Ensayo de C.B.R.

**Fuente:** Elaboración propia

Compactar tres moldes con cinco capas cada uno, pero diferente número de golpes (12, 25 y 56 golpes) seguido enrasar de manera que la superficie deberá estar liza para finalmente pesar la

muestra compactada con el collarín, luego se sumerge al agua durante cuatro días, pasado los 4 días se realizará la penetración, como se puede observar en la secuencia de imágenes.

### 3.1.2.10. Relación Humedad-Densidad de mezclas compactadas

Se realizó el ensayo modificado de compactación (ASTM D558 - AASHTO T134).

#### ➤ Procedimiento en laboratorio

##### A. Suelo Reciclado

El ensayo se realizó según la norma especificada en el capítulo 2.

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 54.** Preparación de la Muestra para el ensayo de Relación Humedad Densidad  
**Fuente:** Elaboración propia

Mezclar de manera homogénea, posteriormente se le agrega agua para el primer punto, se compactan cinco capas con 56 golpes, seguido enrasar, de manera que la superficie deberá estar liza.



**Figura 55.** Moldeo y Pesaje de los moldes  
**Fuente:** Elaboración propia

Finalmente, pesar la muestra compactada sin el collarín, como se observa en la secuencia de imágenes.



**Figura 56.** Determinación del Contenido de Humedad de la muestra

**Fuente:** Elaboración propia

Extraer una muestra para llevar al horno y determinar el contenido de humedad para un punto, así posteriormente se le adiciona agua para el siguiente punto hasta poder obtener cuatro puntos para poder determinar la curva relación densidad seca máxima vs. humedad óptima.

### **B. Suelo Reciclado más cemento Portland**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 57.** Ensayo Relación Humedad–Densidad (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland)

**Fuente:** Elaboración propia

El ensayo se realizó de la misma manera que en el inciso A, adicionando cemento Portland, posteriormente se le agrega agua para un primer punto, se compacta cinco capas con 56 golpes seguido, se enrasa de manera que la superficie deberá estar liza para finalmente pesar la muestra compactada sin el collarín. Luego extraer una muestra para el contenido de humedad para un punto, posteriormente se le adiciona agua para el siguiente punto hasta poder obtener cuatro puntos para poder determinar la curva relación densidad seca máxima vs. humedad óptima, como se puede observar en la secuencia de imágenes.

### **C. Suelo Reciclado más cemento Portland más aditivo**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 58.** Ensayo Relación Humedad-Densidad (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y aditivo NovoCrete)

**Fuente:** Elaboración propia

El ensayo se realizó de la misma manera que en el inciso A, adicionando cemento Portland y aditivo NovoCrete, posteriormente se le agrega agua para un primer punto, se compacta cinco capas con 56 golpes seguido, se enrasa de manera que la superficie deberá estar liza para finalmente pesar la muestra compactada sin el collarín. Luego extraer una muestra para el contenido de humedad para un punto, posteriormente se le adiciona agua para el siguiente punto hasta poder obtener cuatro puntos para poder determinar la curva relación densidad seca máxima vs. humedad óptima, como se puede observar en la secuencia de imágenes.

### **3.1.2.11. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados**

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento (ASTM D1632 – ASTM D1633).

#### **➤ Procedimiento en laboratorio**

##### **A. Suelo Reciclado**

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 59.** Preparación de muestra para la realización de cilindros

**Fuente:** Elaboración propia

El ensayo se realizó por el método B descrito en la norma especificada, con la preparación de la muestra compensando el material, así mezclando de manera homogénea, posteriormente se

le agrega el contenido óptimo de agua ya determinada en el ensayo de relación humedad-densidad para la fabricación de cilindros, como se puede observar en la secuencia de imágenes.



**Figura 60.** Curado de cilindros para la posterior rotura

**Fuente:** Elaboración propia

Preparar la muestra para compactar tres capas con 25 golpes seguido, se deberá enrasar para posteriormente extraer la muestra de la probeta con el gato hidráulico para luego llevarlos a la cámara húmeda por un tiempo de 7 días

Posterior al curado se deberá sumergir en agua durante 4 horas para así luego secarla superficialmente, pero como se puede observar en las imágenes, las probetas de suelo reciclado se desvanecen por completo.

### **B. Suelo Reciclado más cemento Portland**

El ensayo se realizó de la misma manera que en el inciso A, adicionando cemento Portland, posteriormente se realizó por el método B, descrito en la norma especificada, con la preparación de la muestra compensando el material, mezclando el suelo reciclado con el cemento Portland de manera homogénea, posteriormente se le agrega el contenido óptimo de agua ya determinada en el ensayo de relación humedad-densidad para la fabricación de cilindros.

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 61.** Curado de cilindros para la rotura (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland)

**Fuente:** Elaboración propia

Preparar la muestra para compactar tres capas con 25 golpes seguido, se deberá enrasar para posteriormente extraer la muestra de la probeta con el gato hidráulico para luego llevarlos a la cámara húmeda por un tiempo de 7 días.



**Figura 62.** Rotura de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland)  
**Fuente:** Elaboración propia

Posterior al curado se deberá sumergir en agua durante 4 horas para así luego secarla superficialmente y poder romper con la prensa y obtener la resistencia.

### C. Suelo Reciclado más cemento Portland más aditivo

El ensayo se realizó de la misma manera que en el inciso A, adicionando cemento Portland y aditivo NovoCrete, posteriormente se realizó por el método B, descrito en la norma especificada, con la preparación de la muestra compensando el material, así mezclando el suelo reciclado con el cemento Portland y aditivo NovoCrete de manera homogénea, posteriormente se le agrega el contenido óptimo de agua determinada en el ensayo de relación humedad-densidad para la fabricación de cilindros.

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 63.** Curado de cilindros para la rotura (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y aditivo NovoCrete)  
**Fuente:** Elaboración propia

Preparar la muestra para compactar tres capas con 25 golpes seguido, se deberá enrasar para posteriormente extraer la muestra de la probeta con el gato hidráulico para luego llevarlos a la cámara húmeda por un tiempo de 7 días.



**Figura 64.** Rotura de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y aditivo NovoCrete)

**Fuente:** Elaboración propia

Posterior al curado se deberá sumergir en agua durante 4 horas para así luego secarla superficialmente y poder romper con la prensa y obtener la resistencia, como se observa en la secuencia de imágenes.

### 3.1.2.12. *Ensayo de durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas)*

Se realizó el ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de mezclas) de Suelo-Cemento (ASTM D559 - AASHTO T135).

#### ➤ **Procedimiento realizado en laboratorio**

##### **A. Suelo Reciclado más cemento Portland**

El ensayo se realizó por el método B, descrito en la norma especificada, con la preparación de la muestra compensando el material, así mezclando el suelo reciclado con el cemento Portland de manera homogénea, posteriormente se le agrega el contenido óptimo de agua ya determinada en el ensayo de relación humedad-densidad para la fabricación de cilindros.

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 65.** Preparación de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland)

**Fuente:** Elaboración propia

Preparar la muestra para compactar tres capas con 25 golpes seguido, se deberá enrasar para posteriormente extraer la muestra de la probeta con el gato hidráulico para luego llevarlos a la cámara húmeda por un tiempo de 7 días.



**Figura 66.** Curado y Secado de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland)

**Fuente:** Elaboración propia

Posterior al curado, se deberá sumergir en agua durante 5 horas para luego secarla superficialmente, registrar el peso y someter 42 horas al horno a una temperatura de  $71 \pm 3^\circ\text{C}$



**Figura 67.** Cepillado de Cilindros para el Ensayo de Durabilidad (Combinación de Suelo Reciclado y Cemento Portland)

**Fuente:** Elaboración propia

Terminado el tiempo, se deberá realizar el cepillado. De igual manera registrar el peso, este procedimiento de cepillado, inmersión al agua y secado en horno de los cilindros será un ciclo, el cual se deberá realizar 12 ciclos, pudiendo determinar la pérdida de masa y cambios de volumen.

### **B. Suelo Reciclado más cemento Portland más aditivo**

El ensayo se realizó de la misma manera que en el inciso A, adicionando cemento Portland y aditivo NovoCrete, posteriormente se realizó por el método B, descrito en la norma especificada, con la preparación de la muestra compensando el material, así mezclando el suelo reciclado con el cemento Portland y el aditivo de manera homogénea, posteriormente se le agrega el contenido



óptimo de agua ya determinada en el ensayo de relación humedad-densidad para la fabricación de cilindros

A continuación, se observa la siguiente secuencia de imágenes.



**Figura 68.** Curado y Secado de cilindros (Combinación de Suelo Reciclado, Cemento Portland y NovoCrete)

**Fuente:** Elaboración propia

Se prepara la muestra para compactar tres capas con 25 golpes seguido, seguido se enrasa para posteriormente extraer la muestra de la probeta con el gato hidráulico para luego llevarlos a la cámara húmeda por un tiempo de 7 días. Posterior al curado se deberá sumergir en agua durante 5 horas para así luego secarla superficialmente, registrar el peso y someter 42 horas al horno a una temperatura de  $71\pm 3^{\circ}\text{C}$ , terminado el tiempo se deberá realizar el cepillado de igual manera registrar el peso durante 12 ciclos, pudiendo determinar la pérdida de masa y cambios de volumen.

## CALCULO IV

### 4. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con las especificaciones técnicas, deben cumplir ciertos requerimientos, así para poder comparar resultados.

#### 4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE SUELO RECICLADO

Los primeros ensayos realizados fue el suelo reciclado sin adición de ningún agente químico, para llegar a los requerimientos.

##### 4.1.1. Análisis granulométrico por tamizado

El ensayo análisis granulométrico por tamizado se efectuó según las siguientes normas de referencia, (AASHTO T27-93 y ASTM D422-63). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 1).

— **Resultados del ensayo**

**Tabla 14.** Análisis Granulométrico de Suelo Reciclado del agregado grueso

Abertura “	Abertura mm	Peso Retenido [g]	% Parcial Retenido %Rp	Acumulado	
				% Retenido %Rt	% que pasa %Pt
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	1050,00	13,35	13,35	86,65
3/4"	19,10	983,00	12,50	25,85	74,15
1/2"	9,52	1049,00	13,34	39,18	60,82
3/8"	9,52	429,00	5,45	44,64	55,36
No. 4"	4,76	724,00	9,20	53,84	46,16
<b>Total</b>		4235,00			

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 15.** Análisis Granulométrico de Suelo Reciclado del agregado fino

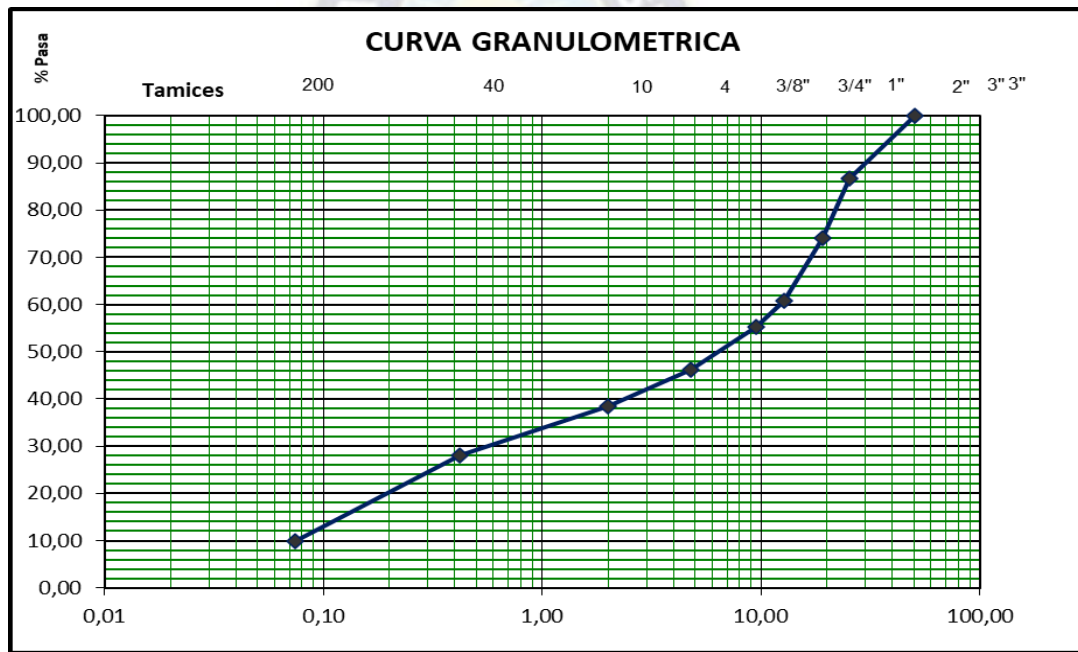
Tamiz	Abertura mm	Peso Retenido [g]	% Parcial Retenido %Rp	Acumulado		% que pasa Total
				% Retenido %Rt	% que pasa %Pt	
No. 4"	4,76	0			100	46,16
No. 10	2,00	126,00	16,59	16,59	83,41	38,50
No. 40	0,42	172,00	22,64	39,23	60,77	28,05
No. 200	0,07	299,00	39,36	78,58	21,42	9,89
<b>Total</b>		597,00				

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 16.** Distribución granulométrica de partículas

Designación	Diámetro de partículas mm	Porcentaje que pasa
2"	50,80	100,00
1"	25,40	86,651
3/4"	19,10	74,155
1/2"	12,70	60,819
3/8"	9,52	55,365
N°4	4,76	46,161
N°10	2,00	38,505
N°40	0,42	28,054
N°200	0,07	9,886

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 1.** Curva Granulométrica Suelo Reciclado

Fuente: Elaboración propia

La granulometría del material reciclado puede variar según la ubicación y las características del pavimento existente. Es importante realizar un análisis detallado de la granulometría para determinar las distribuciones de tamaños porcentuales de las partículas que constituyen el suelo. Esto implica mezclar los diferentes tamaños de partículas (arena, limo, arcilla) de manera que se optimicen las propiedades mecánicas del suelo.

Un exceso de finos puede conducir a problemas de cohesión y expansión, Dado que una falta de finos puede tener como consecuencia una falta de cohesión y resistencia.

De acuerdo a los cálculos se obtuvo la siguiente distribución de tamaño del suelo en porcentaje.

**Tabla 17.** Porcentaje de partículas

<b>GRAVA [%]</b>	<b>55,37</b>
<b>ARENA [%]</b>	<b>38,51</b>
<b>FINO [%]</b>	<b>9,89</b>
<b>TOTAL [%]</b>	<b>100,00</b>

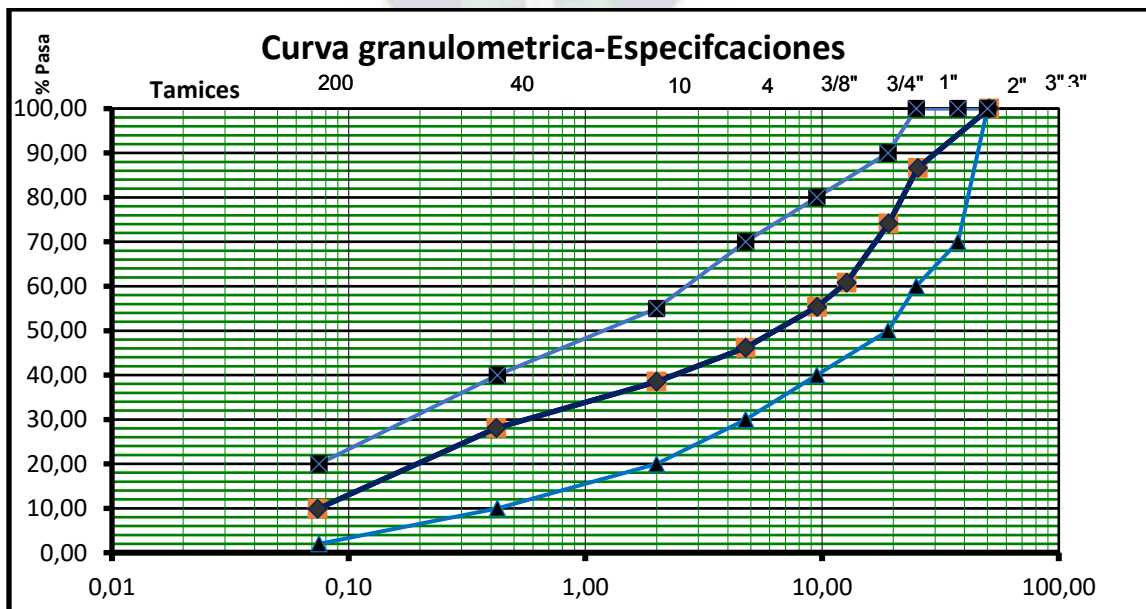
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realizó el ajuste en una de las franjas granulométricas para el material a reciclar.

**Tabla 18.** Distribución del *Límite* Superior e Inferior

Designación	Designación	LÍMITE	LÍMITE
		INFERIOR	SUPERIOR
2"	50,00	100	100
1 1/2"	37,50	70	100
1"	25,00	60	100
3/4"	19,00	50	90
3/8"	9,50	40	80
N°4	4,75	30	70
N°10	2,00	20	55
N°40	0,43	10	40
N°200	0,08	2	20

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 2.** Curva Granulométrica con los *Límites* Superior e Inferior

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2. Límites de consistencia del suelo (límites de Atterberg)

El límite líquido indica la cantidad de agua que un suelo puede contener mientras aún se comporta plásticamente. En una capa base, si el límite líquido es alto puede indicar mayor cohesión y menor susceptibilidad a cambios de volumen con variaciones en el contenido de agua.

El límite plástico indica el contenido de agua, debajo del cual el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido. En una capa base, un límite plástico más bajo puede indicar una mayor capacidad para soportar cargas sin deformaciones excesivas.

##### — Resultados del ensayo

**Tabla 19.** Límites de consistencia

<b>RESULTADOS</b>	
<b>LL</b>	NP
<b>LP</b>	NP
<b>IP</b>	NP
<b>IG=</b>	0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 20.** Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura

<b>CARACTERÍSTICAS DE LA GRANULOMETRÍA</b>			
D <sub>10</sub>	0,08	Cu	<b>157,35</b>
D <sub>30</sub>	0,75	Cc	<b>0,60</b>
D <sub>60</sub>	12,24		

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar los resultados, se encuentra en el rango necesario (Tabla 9-INVIAS).

#### 4.1.3. Límite de contracción (método de la parafina)

El ensayo límite de contracción (método de la parafina) se efectuó según la siguiente norma de referencia, (ASTM D4943-18). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 2).

##### — Resultados del ensayo

**Tabla 21.** Volúmenes para Cálculo de Límite de Contracción

<b>VOLUMEN DE PARAFINA</b>	14,60
<b>VOLUMEN DEL SUELO SECO</b>	40,10

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 22.** Resultado de Límite de Contracción

<b>CÁLCULO DE FACTORES</b>
----------------------------

<b>Límite de contracción LC</b>	13,24%
<b>Relación de Contracción RC</b>	1,70
<b>Contracción Volumétrica CV</b>	17,95
<b>Contracción Lineal CL</b>	6,38

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.4. Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición

Un suelo ha de considerarse orgánico, si el contenido de material orgánica determinado sobrepasa el 1% (Tabla 9-INVIAS).

El ensayo determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición se efectuó según las siguientes normas de referencia, (INV E – 121-13 y AASHTO T194). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 3).

— **Resultados del ensayo**

**Tabla 23.** Contenido de material Orgánica

Contenido de material orgánica	Diferentes Cantidades	
	A	B
Peso del plato + suelo de evaporación antes de la ignición	3234,90	5057,70
Peso del plato + suelo de evaporación después de la ignición	3208,80	5037,70
Peso del plato	353,00	3029,10
% Material Orgánica	0,91	0,99

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.5. Equivalente de arena

El ensayo equivalente de arena se efectuó según las siguientes normas de referencia, (AASHTO T176-79 y ASTM D2419-74). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 4).

— **Resultados del ensayo**

**Tabla 24.** Ensayo de Equivalente de Arena

MUESTRA	1	2	3	PROMEDIOS
Lectura en suspensión - L.A.=	11	10,4	7,4	
Lectura en sedimentación TOTAL- L.B.=	13,1	12,9	12	
Lectura en sedimentación =	3,1	2,9	2	
Equivalente arena E.A.=	29	28	28	28
% de Finos =	71	72	72	72

Fuente: Elaboración propia

Es una propiedad que se utiliza para evaluar la calidad de los suelos y agregados, se expresa en porcentaje y determina mediante un ensayo que evalúa la cantidad de partículas finas y arcillosas existentes en una muestra. Un valor alto de E.A. (Equivalente Arena) indica una mayor proporción de partículas limosas y menor partícula fina y arcillosa.

El valor obtenido fue de 28% indicando una menor proporción de partículas limosas y más partículas finas y arcillosas.

#### 4.1.6. Gravedad específica de las partículas sólidas

El ensayo gravedad específica de las partículas sólidas se efectuó según las siguientes normas de referencia, (AASHTO T100-70 y ASTM D854-02). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 5).

##### — Resultados del ensayo

**Tabla 25.** Gravedad Especifica de las Partículas Sólidas

Picnómetro No.	A	B
<b>Peso Picnómetro + Agua + Suelo W1 [g]</b>	733,6	731,1
<b>Temperatura T [°C]</b>	18	18
<b>Peso específico del Agua T = 20°C G T=20</b>	<b>0,9982</b>	<b>0,9982</b>
<b>Peso Picnómetro + Agua W2 [g]</b>	665,6	663,1
<b>Recipiente de evaporación No.</b>	<b>H-1</b>	<b>H-2</b>
<b>Peso del recipiente + Suelo Seco Wrs [g]</b>	200,1	222,5
<b>Peso del recipiente Wr [g]</b>	91,5	113
<b>Peso del suelo seco Ws [g]</b>	108,6	109,5
<b>Peso específico del agua a temperatura de ensayo G T=18</b>	<b>0,9986</b>	<b>0,9986</b>
<b>Relación entre densidades del agua K</b>	1,0004	1,0004
<b>Peso del picnómetro WB [g]</b>	167,9	164,8
<b>Peso Específico del Suelo Gs</b>	2,676	2,64
<b>Peso Específico del Suelo (PROMEDIO) Gs</b>	2,66	

Fuente: Elaboración propia

Los valores típicos de la gravedad específica, están asociados a los valores de los minerales constituyentes de la fase sólida del suelo, los cuales son.

Gravas 2,65 a 2,68

Arenas 2,65 a 2,68

Limos 2,66 a 2,70

Arcillas 2,68 a 2,80

#### 4.1.7. Peso específico de agregado grueso

El ensayo, peso específico de agregado grueso se efectuó según la siguiente norma de referencia, (ASTM C128). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 6).

— **Resultados del ensayo**

**Tabla 26.** Peso Específico de Agregado Grueso

MUESTRA Nro.	1
Peso recipiente seco =	148,5
Peso muestra saturada superficialmente seca B=	4224,700
Peso muestra + canastilla (sumergidos) C1=	3419,200
Peso canastillo sumergido C2=	816,900
Peso muestra sumergida C=C1-C2=	2602,300
Peso igual volumen de agua D=B-C=	1622,400
PESO ESPECÍFICO G <sub>ss</sub> =B/D=	2,604
Peso Específico seco G <sub>s</sub> =A/D=	<b>2,482</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 27.** Absorción del Agregado Grueso

**ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO ASTM C-127**

Peso muestra secada al Horno + recipiente	4174,500
Peso muestra secada al Horno A=	4026,000
Peso agua Absorbida E=B-A=	198,700
Absorción en porcentaje (E/A) * 100=	4,935
<b>ABSORCIÓN PROMEDIO en %</b>	<b>4,935</b>

Fuente: Elaboración propia

El ensayo peso específico es una propiedad para evaluar la calidad y las propiedades de ingeniería de estos materiales. Estos valores se utilizan en el diseño y la construcción para garantizar la estabilidad, la resistencia y la durabilidad de las estructuras que utilizan agregados gruesos

La absorción indica la cantidad de agua que puede penetrar en los poros permeables de los agregados.

#### 4.1.8. Clasificación del tipo de suelos

La clasificación de suelo se obtuvo según las siguientes normas de referencia, (S.U.C.S y A.A.S.H.T.O.). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación.



— **Resultados del ensayo**

**Tabla 28.** Características para la Clasificación del Suelo

CARACTERÍSTICAS DE LA GRANULOMETRÍA				
		Designación	Diámetro de partículas mm	Porcentaje que pasa
D <sub>10</sub>	0,08			
D <sub>30</sub>	0,75			
D <sub>60</sub>	12,24	2"	50,80	100,00
Coefficiente de uniformidad (Cu)	<b>157,35</b>	1"	25,40	86,651
Grado de curvatura (Cc)	<b>0,60</b>	3/4"	19,10	74,155
		1/2"	12,70	60,819
<b>RESULTADOS LÍMITES DE ATTERBERG</b>		3/8"	9,52	55,365
<i>Límite Líquido (LL)</i>	NP	N°4	4,76	46,161
<i>Límite Plástico (LP)</i>	NP	N°10	2,00	38,505
<i>Índice de Plasticidad (IP)</i>	NP	N° 40	0,42	28,054
<i>Índice de Grupo (IG)</i>	0	N° 200	0,07	9,886

Fuente: Elaboración propia

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO											
Clasificación	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
Grupo:	A-1		A-3	A-2-4				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Porcentaje que pasa											
N° 10 (2mm)	50 máx	-	-								
N° 40 (0,425mm)	30 máx	50 máx	51 mín								
N° 200 (0,075mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx			36 min				
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Límite líquido	-	-	-	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín (2)
Índice de plasticidad	6 máx		NP (1)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Constituyentes principales	Fracmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrado	Excelente a bueno						Pobre a malo				
Índice de Grupo	0		0	0		4 Max.		8 Max.	12 Max.	16 Max.	20 Max.

**Figura 69.** Sistema de Clasificación de Suelo

Fuente: A.A.S.H.T.O.



— **Resultados del ensayo**

**Tabla 31.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del Suelo Reciclado

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11005	11192	11385	11434
Peso Suelo Húmedo	gr	4552	4739	4932	4981
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2162	2251	2343	2366
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	338,30	522,10	598,60	593,20
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	335,70	512,00	575,20	557,00
Peso Agua	gr	2,60	10,10	23,40	36,20
Peso Cápsula	gr	91,60	57,20	57,90	59,40
Peso Suelo Seco	gr	244,10	454,80	517,30	497,60
Contenido de Humedad	%	1,1	2,2	4,5	7,3
Peso Específico Seco	Kg/m3	2140	2202	2242	2206
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 32.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del Suelo Reciclado

Densidad Máxima =	2242	Kg/m3
Humedad Óptima =	4,4	%

Fuente: Elaboración propia

La densidad seca se caracteriza por la masa de las partículas del suelo en unidad de volumen, excluyendo el contenido de agua. Se obtuvo resultados, donde la densidad máxima es de 2242 kg/m<sup>3</sup> y la humedad óptima dio 4,4%.

**4.1.10. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento**

El ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D1632 – ASTM D1633). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 8).

— **Resultados del ensayo**

Se procedió a la elaboración de cilindros para ser ensayadas en laboratorio. El procedimiento de curado de las probetas se llevó a cabo a los 7 días previos a la ejecución de la rotura.

Posteriormente, se sometió a inmersión durante cuatro horas. Durante la inmersión, se constató que los cilindros se desvanecieron por completo, sin lograr una resistencia de suelo reciclado.

#### 4.1.11. Relación California (CBR)

El ensayo, Relación California CBR se efectuó según las siguientes normas de referencia, (AASHTO T193-03 y ASTM D1883-07). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 9).

— **Resultados del ensayo**

**Tabla 33.** Compactación de la muestra

<b>COMPACTACIÓN DE LA MUESTRA</b>						
Embebido	Antes	Des.	Antes	Des.	Antes	Des.
Nº de Molde	4		5		6	
Nº de golpes por capa	5/12		5/25		5/56	
Peso Hum. Muestra + molde	12998	12998	13062	13062	13115	13115
Peso del molde	8099		8088		8077	
Peso Húmedo de la Muestra	4899	4899	4974	4974	5038	5038
Volumen de la Probeta	2149		2160		2157	
Densidad Húmeda de Muestra	2280	2280	2303	2303	2336	2336

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 34.** Humedades de compactación

<b>HUMEDADES DE COMPACTACIÓN</b>						
Nº de Tara	A	B	C	D	E	F
Peso Suelo Húmedo + Tara	306,00	426,00	305,70	437,10	307,00	509,10
Peso Suelo Seco + Tara	296,00	404,20	295,00	415,30	296,50	483,50
Peso del Agua	10,00	21,80	10,70	21,80	10,50	25,60
Peso de la Tara	60,30	60,30	58,50	57,90	60,30	60,30
Peso del Suelo Seco	235,70	343,90	236,50	357,40	236,20	423,20
% de Humedad	4,24	6,34	4,52	6,10	4,45	6,05

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 35.** CBR - Factor de Deformación de la Anilla

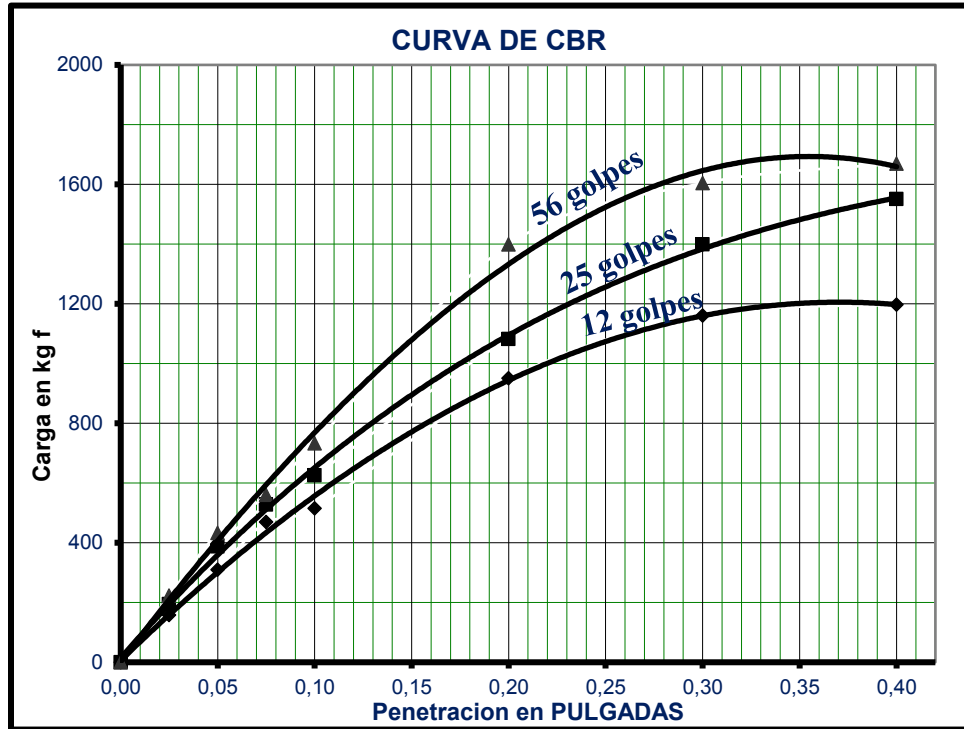
<b>PENETRACIÓN</b>			Lectura	Kg F	CBR%	Lectura	Kg F	CBR%	Lectura	Kg F	CBR%
<b>Tiem.</b>	<b>Pulg.</b>	<b>Cm.</b>	<b>12</b>			<b>25</b>			<b>56</b>		
0,5	0,025	0,63	38	157,5		47	195		54	223	
1,0	0,050	1,27	75	310		94	388		105	433	
1,5	0,075	1,90	114	470		128	527		136	560	
<b>2,0</b>	<b>0,1</b>	<b>2,54</b>	<b>125</b>	<b>515</b>	<b>37,9</b>	<b>152</b>	<b>626</b>	<b>46,0</b>	<b>178</b>	<b>733</b>	<b>53,9</b>
<b>4,0</b>	<b>0,2</b>	<b>5,08</b>	<b>231</b>	<b>951</b>	<b>46,6</b>	<b>263</b>	<b>1082</b>	<b>53,0</b>	<b>340</b>	<b>1399</b>	<b>68,6</b>
6,0	0,300	7,62	282	1160		340	1399		390	1604	
8,0	0,400	10,16	291	1197		377	1551		406	1670	

Fuente: Elaboración propia

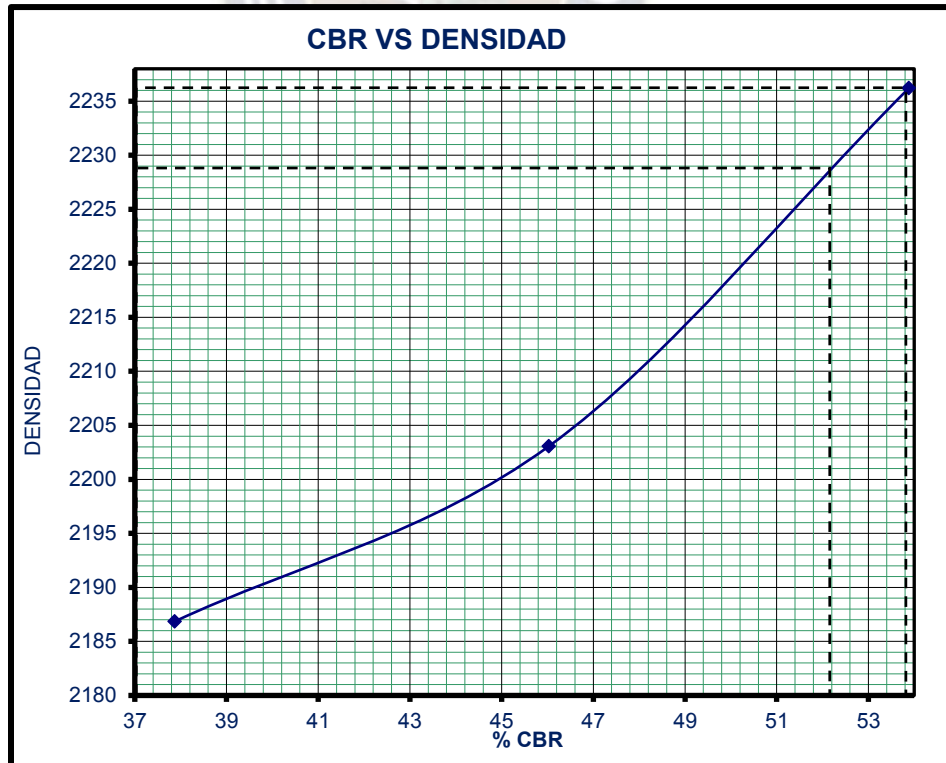
**Tabla 36.** Valores de CBR al 100% Y 95% de suelo reciclado

<b>CBR 100% T 180 D (0,1")</b>	<b>CBR 95% T 180 D (0,1")</b>
<b>54</b>	<b>52</b>

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 3.** Curva de CBR  
Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 4.** Relación Peso Unitario CBR  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.12. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS CON SUELO RECICLADO

- ✍ A partir de los resultados obtenidos, con los ensayos análisis granulométrico y límites de consistencia, se logró clasificar al suelo reciclado mediante el método AASHTO Y SUCS, resultando *A-1-a (0)*; *GP-GM* respectivamente. Dando como un material apto para reciclar
- ✍ En función de los requerimientos de las especificaciones técnicas, se evaluó si cumplen o no.

**Tabla 37.** Comparación INV E 350-13 y Resultados obtenidos Suelo Reciclado

Características	Artículo INV E 350-13	Resultados de ensayos	Observación
Límite líquido % máximo	30	NP	Cumple
Índice de plasticidad % máximo	12	NP	Cumple
Contenido de material orgánica % máxima	1	0,95	Cumple

**Fuente:** Elaboración propia

- ✍ Se llevaron a cabo ensayos para ver los requerimientos de una capa base, ya que el resultado del proyecto será una capa base reciclada.

**Tabla 38.** Resultados de las propiedades físicas del suelo reciclado

ENSAYOS	RESULTADOS
Límite de contracción (Método de la parafina)	13,24 %
Equivalente Arena	28,00 %
Gravedad específica de las partículas sólidas	2,66
Peso específico de agregado grueso	2,60

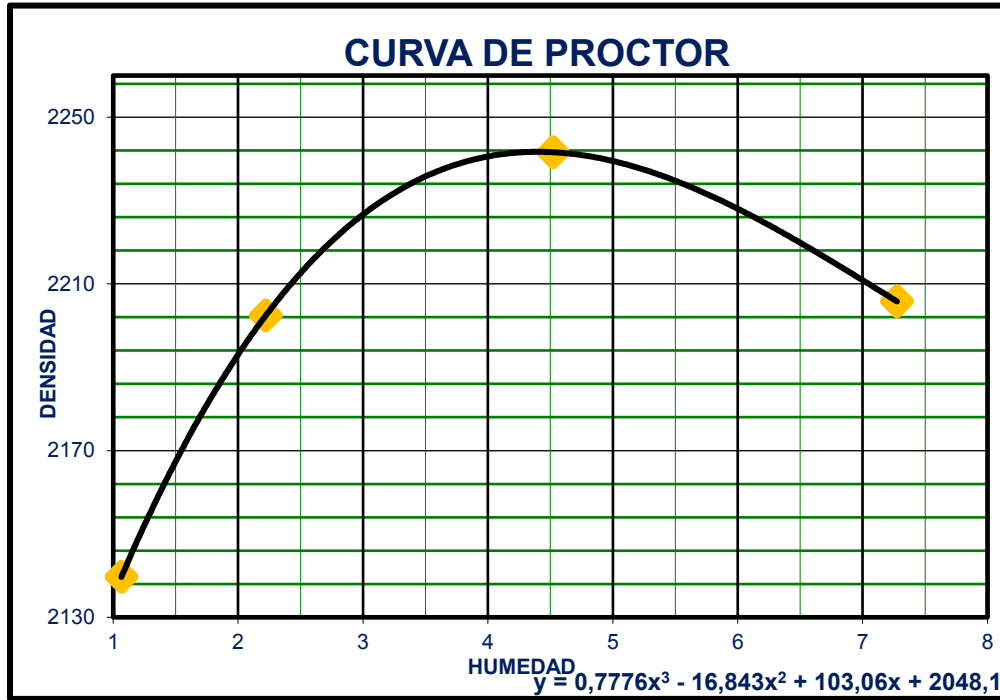
**Fuente:** Elaboración propia

- ✍ En el ensayo de relación Humedad-Densidad para suelo reciclado, se logró establecer la curva densidad máxima vs. Humedad Óptima.

**Tabla 39.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del Suelo Reciclado

Densidad Máxima =	<b>2242</b>	<b>Kg/m3</b>
Humedad Óptima =	<b>4.4</b>	<b>%</b>

**Fuente:** Elaboración propia



**Gráfico 5.** Curva de Compactación Suelo Reciclado

**Fuente:** Elaboración propia

- ✍ Después de conocer la densidad seca máxima y humedad óptima adecuada, se realiza el moldeo de los cilindros, sin embargo, no se logra el éxito debido al desvanecimiento de estos.
- ✍ Se llevó a cabo el ensayo de CBR con tres moldes con distinto número de golpes tales como 12, 25 y 56 golpes.

**Tabla 40.** Resultados de CBR

Golpes	CBR a 0,1"	CBR a 0,2"	Densidad Seca (g/cm <sup>3</sup> )
12 golpes	37,9	46,0	2187
25 golpes	46,0	53,0	2203
56 golpes	53,6	68,6	2236

**Fuente:** Elaboración propia

## 4.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO PORTLAND

Se realizó ensayos con suelo reciclado y cemento Portland a diferentes porcentajes (1%, 2%, 3,5%, 4%, 6%, 8%).

### 4.2.1. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento

Este ensayo permite determinar la densidad máxima seca así también como la humedad óptima.

El ensayo relación humedad – densidad de la mezcla compactada de suelo-cemento se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D558 - AASHTO T134). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 10).

#### — Resultados del ensayo

#### A. SUELO RECICLADO + 1%CEMENTO PORTLAND (SR + 1%CP)

Tabla 41. Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 1%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11032	11350	11370	11325
Peso Suelo Húmedo	gr	4579	4897	4917	4872
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2175	2326	2336	2314
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	546,00	656,00	697,00	616,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	536,40	631,60	659,50	579,70
Peso Agua	gr	9,60	24,40	37,50	36,30
Peso Cápsula	gr	91,50	113,00	106,30	114,00
Peso Suelo Seco	gr	444,90	518,60	553,20	465,70
Contenido de Humedad	%	2,2	4,7	6,8	7,8
Peso Específico Seco	Kg/m3	2129	2222	2188	2147
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 1%CP)

Densidad Máxima =	2222	Kg/m3
Humedad Óptima =	4,9	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2222 kg/m3 y la humedad óptima es de 4,9%,



**B. SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO PORTLAND (SR + 2%CP)**

**Tabla 43.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 2%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11141	11364	11431	11305
Peso Suelo Húmedo	gr	4688	4911	4978	4852
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2227	2333	2365	2305
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	478,00	481,00	353,00	544,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	468,00	464,00	336,00	513,00
Peso Agua	gr	10,00	17,00	17,00	31,00
Peso Cápsula	gr	59,00	61,00	60,00	106,40
Peso Suelo Seco	gr	409,00	403,00	276,00	406,60
Contenido de Humedad	%	2,4	4,2	6,2	7,6
Peso Específico Seco	Kg/m3	2174	2239	2228	2142
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 44.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 2%CP)

Densidad Máxima =	2246	Kg/m3
Humedad Óptima =	5,0	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2246 kg/m3 y la humedad óptima es de 5,0%.

**C. SUELO RECICLADO + 3,5%CEMENTO PORTLAND (SR + 3,5%CP)**

**Tabla 45.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 3,5%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11020	11303	11415	11382
Peso Suelo Húmedo	gr	4567	4850	4962	4929
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2170	2304	2357	2342
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	462,00	422,00	345,00	424,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	455,00	409,00	332,00	400,00
Peso Agua	gr	7,00	13,00	13,00	24,00
Peso Cápsula	gr	57,00	60,00	62,00	60,00
Peso Suelo Seco	gr	398,00	349,00	270,00	340,00
Contenido de Humedad	%	1,8	3,7	4,8	7,1
Peso Específico Seco	Kg/m3	2132	2221	2249	2187
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 46.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 3,5%CP)

Densidad Máxima =	2252	Kg/m3
Humedad Óptima =	5,2	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2252 kg/m<sup>3</sup> y la humedad óptima es de 5,2%.

**D. SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO PORTLAND (SR + 4%CP)**

**Tabla 47.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 4%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11165	11367	11442	11368
Peso Suelo Húmedo	gr	4712	4914	4989	4915
Peso Especifico Húmedo	Kg/m <sup>3</sup>	2238	2334	2370	2335
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	413,00	437,00	478,00	623,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	406,00	422,00	460,00	584,00
Peso Agua	gr	7,00	15,00	18,00	39,00
Peso Cápsula	gr	60,00	58,00	113,00	91,00
Peso Suelo Seco	gr	346,00	364,00	347,00	493,00
Contenido de Humedad	%	2,0	4,1	5,2	7,9
Peso Especifico Seco	Kg/m <sup>3</sup>	2194	2242	2253	2164
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 48.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 4%CP)

Densidad Máxima =	2253	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad Óptima =	5,3	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2253 kg/m<sup>3</sup> y la humedad óptima es de 5,3%.

**E. SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO PORTLAND (SR + 6%CP)**

**Tabla 49.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 6%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11185	11380	11481	11371
Peso Suelo Húmedo	gr	4732	4927	5028	4918
Peso Especifico Húmedo	Kg/m <sup>3</sup>	2248	2341	2389	2336
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	541,00	510,00	527,00	461,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	530,00	491,00	496,20	430,00
Peso Agua	gr	11,00	19,00	30,80	31,00
Peso Cápsula	gr	59,30	57,90	60,80	57,20
Peso Suelo Seco	gr	470,70	433,10	435,40	372,80
Contenido de Humedad	%	2,3	4,4	7,1	8,3
Peso Especifico Seco	Kg/m <sup>3</sup>	2197	2242	2231	2157
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 50.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 6%CP)

<b>Densidad Máxima =</b>	<b>2255</b>	<b>Kg/m3</b>
<b>Humedad Óptima =</b>	<b>5,6</b>	<b>%</b>

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2255 kg/m3 y la humedad óptima es de 5,6%.

#### F. SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO PORTLAND (SR + 8%CP)

**Tabla 51.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima (SR + 8%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11156	11303	11485	11397
Peso Suelo Húmedo	gr	4703	4850	5032	4944
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2234	2304	2390	2349
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	429,00	396,00	384,00	453,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	420,00	384,00	367,00	424,00
Peso Agua	gr	9,00	12,00	17,00	29,00
Peso Cápsula	gr	59,40	57,90	58,00	56,00
Peso Suelo Seco	gr	360,60	326,10	309,00	368,00
Contenido de Humedad	%	2,5	3,7	5,5	7,9
Peso Específico Seco	Kg/m3	2180	2222	2266	2177
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 52.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 8%CP)

<b>Densidad Máxima =</b>	<b>2266</b>	<b>Kg/m3</b>
<b>Humedad Óptima =</b>	<b>5,7</b>	<b>%</b>

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2266 kg/m3 y la humedad óptima es de 5,7%.

#### 4.2.2. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento

La mezcla de suelo-cemento se diseñó mediante los criterios de resistencia indicados (Tabla 11-INVIAS).

El ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D1632 – ASTM D1633). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 11).

#### — Resultados del ensayo

#### A. SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO PORTLAND (SR + 2%CP)

**Tabla 53.** Rotura de Cilindros de SR + 2%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				755	9,42	0,92
2	05/01/2024	12/01/2024	7	812	10,13	0,99
3				794	9,91	0,97
<b>Promedio =</b>					9,82	0,96

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2246 kg/m<sup>3</sup> y humedad óptima 5,0%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 2% de cemento Portland que otorga una resistencia de 0,96MPa.

**B. SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO PORTLAND (SR + 4%CP)**

**Tabla 54.** Rotura de Cilindros de SR + 4%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				1451	18,11	1,78
2	05/01/2024	12/01/2024	7	1430	17,50	1,72
3				1421	17,39	1,71
<b>Promedio =</b>					17,67	1,73

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2253 kg/m<sup>3</sup> y humedad óptima 5,3%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 4% de cemento Portland que otorga una resistencia de 1,73MPa.

**C. SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO PORTLAND (SR + 6%CP)**

**Tabla 55.** Rotura de Cilindros de SR + 6%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				1945	24,28	2,38
2	08/01/2024	15/01/2024	7	1967	24,07	2,36
3				1957	23,95	2,35
<b>Promedio =</b>					24,10	2,36

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2255 kg/m<sup>3</sup> y humedad óptima 5,6%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 6% de cemento Portland que otorga una resistencia de 2,36MPa.

**D. SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO PORTLAND (SR + 8%CP)**

**Tabla 56.** Rotura de Cilindros de SR + 8%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm <sup>2</sup>	Tensión Rotura Mpa
1				2735	32,82	3,22
2	08/01/2024	15/01/2024	7	2560	31,33	3,07
3				2655	33,14	3,25
				<b>Promedio =</b>	<b>32,43</b>	<b>3,18</b>

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2266 kg/m<sup>3</sup> y humedad óptima 5,7%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 8% de cemento Portland que otorga una resistencia de 3,18MPa.

**4.2.3. Ensayo de durabilidad humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento**

La mezcla de suelo-cemento se diseñará mediante los criterios de durabilidad indicados (Tabla 10-INVIAS)

El ensayo de durabilidad humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D559 - AASHTO T135). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 12).

**— Resultados del ensayo**

**SUELO RECICLADO + %ÓPTIMO CEMENTO PORTLAND (SR + %Óptimo CP)**

**Tabla 57.** Perdida de Suelo Cemento (SR + %Óptimo CP)

Periodo de Curado	Nº DE CICLOS %CP-ÓPTIMO	MASA SATURADA LUEGO DE LA INMERSIÓN	PESO SECO INICIAL	HUMEDAD	MASA LUEGO DEL CEPILLADO	PERDIDAS
CICLO DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO	CICLO 1	2113,30	2024	4,41%	2017,00	0,35%
	CICLO 2	2105,20	2019,3	4,25%	2012,60	0,33%
	CICLO 3	2070,90	2007,6	3,15%	2001,30	0,31%
	CICLO 4	2063,40	2004,9	2,92%	1998,90	0,30%
	CICLO 5	2059,40	2004,1	2,76%	1998,40	0,28%
	CICLO 6	2055,70	2003,4	2,61%	1998,20	0,26%
	CICLO 7	2054,10	2003	2,55%	1998,30	0,23%
	CICLO 8	2053,40	2002,8	2,53%	1998,40	0,22%
	CICLO 9	2051,30	2002,5	2,44%	1999,00	0,17%

<b>CICLO 10</b>	2051,10	1996,9	2,71%	1993,80	0,16%
<b>CICLO 11</b>	2050,80	1977,6	3,70%	1974,80	0,14%
<b>CICLO 12</b>	2049,00	1969,7	4,03%	1967,50	0,11%
				<b>TOTAL=</b>	<b>2,872%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 58.** Cambio de Volumen de Suelo Cemento (SR + %Óptimo CP)

Nº DE CICLOS	Peso después de 5 horas de la inmersión en agua	Peso después de las 42 horas en el horno a 71°C	Diámetro cm	Altura cm	Volumen cm <sup>3</sup>	%Humedad	Variación de Volumen
1	2112,40	1999,00	10,18	11,68	950,67	5,67%	0,56
2	2106,20	2000,60	10,17	11,67	947,99	5,28%	0,84
3	2088,50	1996,40	10,16	11,65	944,50	4,61%	1,21
4	2094,00	1998,70	10,16	11,66	945,31	4,77%	1,12
5	2076,80	1991,50	10,16	11,66	945,31	4,28%	1,12
6	2062,20	1996,00	10,13	11,62	936,52	3,32%	2,04
7	2056,50	1999,90	10,11	11,62	932,82	2,83%	2,43
8	2057,90	1999,20	10,12	11,62	934,67	2,94%	2,24
9	2057,70	2002,30	10,12	11,61	933,86	2,77%	2,32
10	2058,30	2002,80	10,11	11,61	932,02	2,77%	2,51
11	2059,50	2001,20	10,11	11,61	932,02	2,91%	2,51
12	2058,10	2001,00	10,10	11,61	930,18	2,854%	2,71

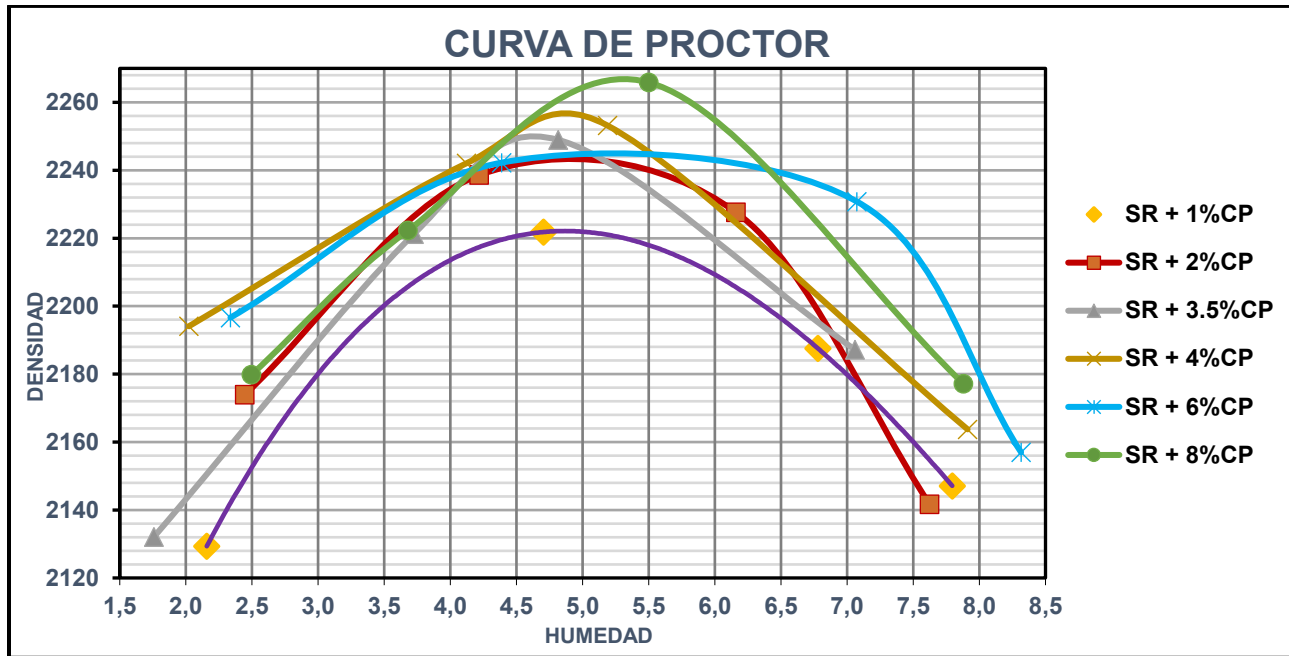
Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.4. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS CON SUELO RECICLADO MÁS CEMENTO PORTLAND

Se logró encontrar la proporción óptima de cemento Portland, logrando incrementar su resistencia y durabilidad del suelo, para el primer enfoque.

El ensayo relación humedad-densidad seca, se realizó con el suelo reciclado más la adición de cemento Portland en diferentes porcentajes.

Se obtuvo los siguientes resultados de densidad máxima y humedad óptima



**Gráfico 6.** Curva Proctor con diferentes Contenidos de Cemento  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 59.** Densidad Máxima y Humedad Óptima a diferentes porcentajes de cemento

Material Reciclado-Cemento	Densidad máxima (Kg/m3)	%
Suelo Reciclado + 1% Cemento	2222	4,90
Suelo Reciclado + 2% Cemento	2246	5,00
Suelo Reciclado + 3,5% Cemento	2252	5,20
Suelo Reciclado + 4% Cemento	2253	5,30
Suelo Reciclado + 6% Cemento	2255	5,60
Suelo Reciclado + 8% Cemento	2266	5,70

Fuente: Elaboración propia

Con la obtención de las humedades óptimas, se realizó probetas para obtener la gráfica de resistencia a la compresión vs. contenido de cemento

Suelo reciclado + %Cemento Portland (**Resistencia**)

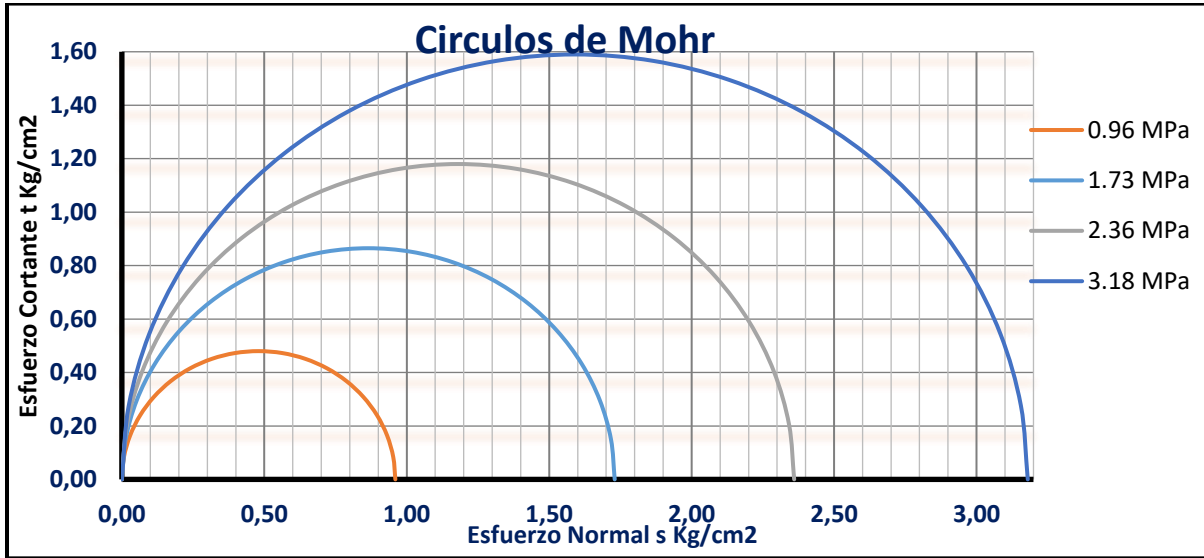


Gráfico 7. Círculos de Mohr y Envolvente de Falla

Fuente: Elaboración propia

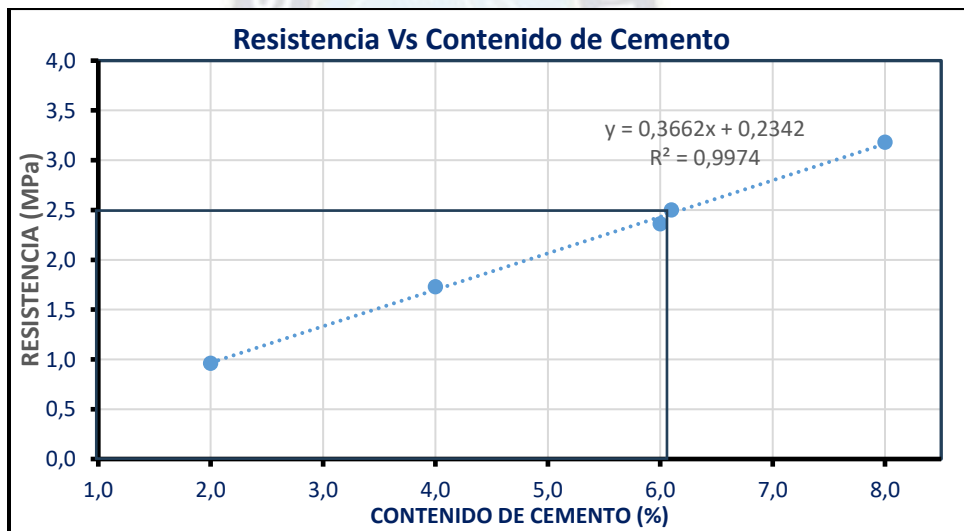


Gráfico 8. Resistencia a la compresión Vs Contenido de Cemento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60. R Vs CC

Contenido de Cemento (%)	Tensión Rotura Mpa
2,00	0,96
4,00	1,73
6,00	2,36
6,10	2,50
8,00	3,18

Fuente: Elaboración propia



Se determinó que el contenido óptimo de cemento cumpla con la resistencia mínima de 2,5 MPa, por lo tanto, se realizó una línea de tendencia mediante la regresión lineal. Dado que el contenido óptimo de cemento Portland es de 6,10% para una resistencia de 2,5MPa.

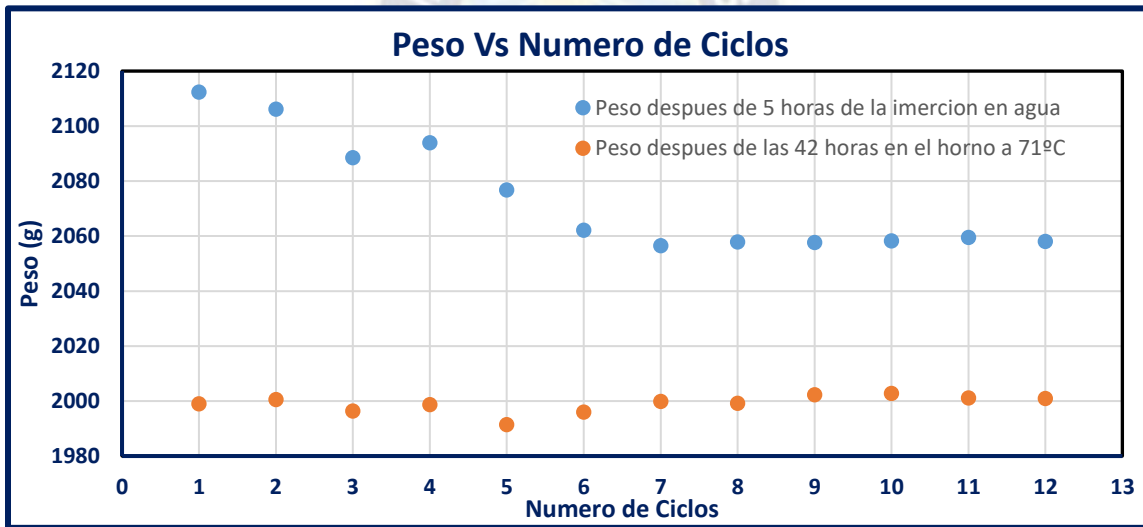
**✍️ Suelo reciclado + %Cemento (Durabilidad)**

El ensayo de durabilidad permite determinar las pérdidas, cambios de humedad y los volumétricos (Expansión y Contracción), se procedió a la elaboración de probetas con el porcentaje óptimo de cemento, lo que dio como resultado.

**Tabla 61.** Resultados de Durabilidad

Material	Contenido de cemento	Perdida de Suelo -Cemento	Cambios de Volumen de Suelo -Cemento	Norma Invias
Granular	6,10%	2,872	2,71	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 9.** Cambio de Volumen Vs Numero de Ciclos SR + 6,10% Óptimo CP

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO Y ADICIÓN DEL NOVOCRETE

Se realizó ensayos con suelo reciclado, cemento Portland a diferentes porcentajes (1%, 2%, 4%, 6%, 8%) y 2% de aditivo NovoCrete con respecto al Cemento Portland.

#### 4.3.1. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento

Este ensayo permite determinar la densidad máxima seca así también como la humedad óptima. Se realizó el ensayo para suelo reciclado con cemento Portland y el aditivo NovoCrete en diferentes porcentajes

El ensayo relación humedad – densidad de la mezcla compactada de suelo-cemento-aditivo se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D558 - AASHTO T134). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 13).

#### — Resultados del ensayo

#### A. SUELO RECICLADO + 1%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 1 % CEMENTO PORTLAND (SR + 1%CP + 2%NC \* 1%C)

**Tabla 62.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 1%CP + 2%NC \* 1%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11087	11310	11387	11315
Peso Suelo Húmedo	gr	4634	4857	4934	4862
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2201	2307	2344	2310
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	667,00	571,00	540,00	643,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	656,00	553,00	516,00	609,00
Peso Agua	gr	11,00	18,00	24,00	34,00
Peso Cápsula	gr	114,00	114,00	91,00	107,00
Peso Suelo Seco	gr	542,00	439,00	425,00	502,00
Contenido de Humedad	%	2,0	4,1	5,6	6,8
Peso Específico Seco	Kg/m3	2158	2216	2219	2163
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 63.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 1%CP + 2%NC \* 1%CP)

Densidad Máxima =	2226	Kg/m3
Humedad Óptima =	5,0	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2226 kg/m3 y la humedad óptima es de 5,0%.

#### B. SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 2% CEMENTO PORTLAND (SR + 2%CP + 2%NC \* 2%CP)

**Tabla 64.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 2%CP + 2%NC \* 2%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	10955	11208	11467	11397
Peso Suelo Húmedo	gr	4502	4755	5014	4944
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2139	2259	2382	2349
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	396,90	252,40	385,10	305,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	391,00	246,80	366,70	288,30
Peso Agua	gr	5,90	5,60	18,40	16,70
Peso Cápsula	gr	60,30	59,40	58,50	86,90
Peso Suelo Seco	gr	330,70	187,40	308,20	201,40
Contenido de Humedad	%	1,8	3,0	6,0	8,3
Peso Específico Seco	Kg/m3	2101	2193	2248	2169
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 65.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 2%CP + 2%NC \* 2%CP)

Densidad Máxima =	2254	Kg/m3
Humedad Óptima =	5,2	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2254 kg/m3 y la humedad óptima es de 5,2%.

**C. SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 4% CEMENTO (SR + 4%CP + 2%NC\*4%CP)**

**Tabla 66.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del SR + 4%CP + 2%NC\*4%CP

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11125	11394	11469	11305
Peso Suelo Húmedo	gr	4672	4941	5016	4852
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2219	2347	2383	2305
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	646,00	575,00	491,00	576,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	635,00	555,00	468,00	542,00
Peso Agua	gr	11,00	20,00	23,00	34,00
Peso Cápsula	gr	113,00	114,00	91,00	107,00
Peso Suelo Seco	gr	522,00	441,00	377,00	435,00
Contenido de Humedad	%	2,1	4,5	6,1	7,8
Peso Específico Seco	Kg/m3	2174	2245	2246	2138
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 67.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 4%CP + 2%NC \* 4%CP)

Densidad Máxima =	2254	Kg/m3
Humedad Óptima =	5,4	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2254 kg/m<sup>3</sup> y la humedad óptima es de 5,4%.

**D. SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete\* 6% CEMENTO PORTLAND (SR + 6%CP + 2%NC\*6%CP)**

**Tabla 68.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 6%CP + 2%NC \* 6%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11158	11368	11495	11405
Peso Suelo Húmedo	gr	4705	4915	5042	4952
Peso Específico Húmedo	Kg/m <sup>3</sup>	2235	2335	2395	2352
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	536,00	379,00	408,00	401,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	526,00	366,00	388,00	375,00
Peso Agua	gr	10,00	13,00	20,00	26,00
Peso Cápsula	gr	60,30	57,20	61,90	58,00
Peso Suelo Seco	gr	465,70	308,80	326,10	317,00
Contenido de Humedad	%	2,1	4,2	6,1	8,2
Peso Específico Seco	Kg/m <sup>3</sup>	2188	2241	2257	2174
DATOS DEL MOLDE	VOLUMEN DEL MOLDE: "C"		2105	PESO DEL MOLDE	6453

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 69.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 6%CP + 2%NC \* 6%CP)

Densidad Máxima =	2259	Kg/m <sup>3</sup>
Humedad Óptima =	5,7	%

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2259 kg/m<sup>3</sup> y la humedad óptima es de 5,7%.

**E. SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete\* 8% CEMENTO PORTLAND (SR + 8%CP + 2%NC\*8%CP)**

**Tabla 70.** Obtención de la Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 8%CP + 2%NC \* 8%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11148	11331	11511	11401
Peso Suelo Húmedo	gr	4695	4878	5058	4948
Peso Específico Húmedo	Kg/m <sup>3</sup>	2230	2317	2403	2351
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	578,40	506,50	501,80	647,30
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	569,00	488,80	478,10	610,40
Peso Agua	gr	9,40	17,70	23,70	36,90
Peso Cápsula	gr	114,10	59,90	109,80	148,50
Peso Suelo Seco	gr	454,90	428,90	368,30	461,90
Contenido de Humedad	%	2,1	4,1	6,4	8,0

<b>Peso Específico Seco</b>	<b>Kg/m3</b>	<b>2185</b>	<b>2225</b>	<b>2258</b>	<b>2177</b>
<b>DATOS DEL MOLDE</b>	<b>VOLUMEN DEL MOLDE: "C"</b>		<b>2105</b>	<b>PESO DEL MOLDE</b>	<b>6453</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 71.** Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima del (SR + 8%CP + 2%NC\*8%CP)

<b>Densidad Máxima =</b>	<b>2261</b>	<b>Kg/m3</b>
<b>Humedad Óptima =</b>	<b>6,0</b>	<b>%</b>

Fuente: Elaboración propia

Se lograron resultados, donde la densidad máxima seca es 2261 kg/m3 y la humedad óptima es de 6,0%.

### 4.3.2. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento

Se diseñó mediante los criterios indicados (Tabla 11-INVIAS).

El ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento-aditivo se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D1632 – ASTM D1633), Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 14).

#### Resultados del ensayo

#### A. SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 2 % CEMENTO PORTLAND (SR + 2%CP + 2%NC\*2%CP)

**Tabla 72.** Rotura de Cilindros de SR + 2%CP + 2%NC\*2%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				910	11,24	1,10
2	24/01/2024	31/01/2024	7	915	11,30	1,11
3				985	12,15	1,19
<b>Promedio =</b>					<b>11,56</b>	<b>1,13</b>

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2254 kg/m3 y humedad óptima 5,2%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 2% de cemento Portland y 2% de NovoCrete respecto al cemento Portland, el cual otorga una resistencia de 1,13MPa.

#### B. SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 4 % CEMENTO PORTLAND (SR + 4%CP + 2%NC\*4%CP)

**Tabla 73.** Rotura de Cilindros de SR + 4%CP + 2%NC\*4%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				1645	20,21	1,98
2	25/01/2024	01/02/2024	7	1580	19,53	1,91
3				1830	22,48	2,20
<b>Promedio =</b>					<b>20,74</b>	<b>2,03</b>

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2254 kg/m3 y humedad óptima 5,4%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 4% de cemento Portland y 2% de NovoCrete respecto al cemento Portland, el cual otorga una resistencia de 2,03MPa.

**C. SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 6 % CEMENTO PORTLAND (SR + 6%CP + 2%NC\*6%CP)**

**Tabla 74.** Rotura de Cilindros de SR + 6%CP + 2%NC\*6%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				2401	29,56	2,90
2	26/01/2024	02/02/2024	7	2408	29,70	2,91
3				2415	29,79	2,92
<b>Promedio =</b>					<b>29,68</b>	<b>2,91</b>

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2259 kg/m3 y humedad óptima 5,7%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 6% de cemento Portland y 2% de NovoCrete respecto al cemento Portland, el cual otorga una resistencia de 2,91MPa.

**D. SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO PORTLAND + 2% NovoCrete \* 8 % CEMENTO PORTLAND (SR + 8%CP + 2%NC\*8%CP)**

**Tabla 75.** Rotura de Cilindros de SR + 8%CP + 2%NC\*8%CP

Probeta No	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1				3125	38,69	3,79
2	26/01/2024	02/02/2024	7	3185	39,19	3,84
3				3105	38,25	3,75
<b>Promedio =</b>					<b>38,71</b>	<b>3,80</b>

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados de la densidad máxima seca 2261 kg/m<sup>3</sup> y humedad óptima 6,0%, se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados, dando como resultado con 8% de cemento Portland y 2% de NovoCrete respecto al cemento Portland, el cual otorga una resistencia de 3,80MPa.

**4.3.3. Ensayo de durabilidad (humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento**

El ensayo de durabilidad humedecimiento y secado de mezclas de suelo-cemento-aditivo se efectuó según las siguientes normas de referencia, (ASTM D559 - AASHTO T135). Los siguientes resultados se mostrarán a continuación (ANEXO 15).

**— Resultados del ensayo con material GRANULAR**

**SUELO RECICLADO + %Óptimo CEMENTO PORTLAND + 2 % NovoCrete \*  
%Óptimo CEMENTO PORTLAND  
(SR+%ÓptimoCP+2%NC\*%Óptimo CP)**

**Tabla 76.** Perdida de Suelo cemento (SR+%ÓptimoCP+2%NC\*%Óptimo CP)

Periodo de Curado	Nº DE CICLOS %CP-ÓPTIMO	MASA SATURADA LUEGO DE LA INMERSIÓN	PESO SECO INICIAL	HUMEDAD	MASA LUEGO DEL CEPILLADO	PERDIDAS
<b>CICLO DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO</b>	<b>CICLO 1</b>	2222,00	2132,30	4,21%	2129,60	0,13%
	<b>CICLO 2</b>	2195,20	2128,50	3,13%	2125,60	0,14%
	<b>CICLO 3</b>	2185,60	2125,30	2,84%	2122,20	0,15%
	<b>CICLO 4</b>	2175,90	2120,00	2,64%	2116,00	0,19%
	<b>CICLO 5</b>	2172,00	2115,70	2,66%	2111,40	0,20%
	<b>CICLO 6</b>	2160,60	2114,80	2,17%	2110,00	0,23%
	<b>CICLO 7</b>	2166,30	2098,30	3,24%	2093,30	0,24%
	<b>CICLO 8</b>	2164,40	2097,20	3,20%	2091,80	0,26%
	<b>CICLO 9</b>	2163,20	2076,60	4,17%	2070,90	0,27%
	<b>CICLO 10</b>	2165,90	2068,00	4,73%	2061,20	0,33%
	<b>CICLO 11</b>	2160,60	2057,00	5,04%	2052,00	0,24%
	<b>CICLO 12</b>	2159,90	2055,00	5,10%	2053,00	0,10%
					<b>TOTAL=</b>	<b>2,467%</b>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 77.** Cambio de Volumen de Suelo cemento (SR+%ÓptimoCP+2%NC\*%Óptimo CP)

Nº DE CICLOS	Peso después de 5 horas de la inmersión en agua	Peso después de las 42 horas en el horno a 71°C	Diámetro cm	Altura cm	Volumen cm <sup>3</sup>	%Humedad	Variación de Volumen
<b>1</b>	2187,00	2101,60	10,17	11,68	948,80	4,06%	0,76
<b>2</b>	2194,10	2094,90	10,17	11,68	948,80	4,74%	0,76

PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y

CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

<b>3</b>	2179,10	2090,50	10,17	11,67	947,99	4,24%	0,84
<b>4</b>	2169,80	2092,10	10,16	11,67	946,12	3,71%	1,04
<b>5</b>	2167,10	2090,20	10,15	11,67	944,26	3,68%	1,23
<b>6</b>	2159,00	2099,50	10,15	11,65	942,64	2,83%	1,40
<b>7</b>	2161,40	2108,30	10,15	11,65	942,64	2,52%	1,40
<b>8</b>	2167,20	2103,70	10,15	11,65	942,64	3,02%	1,40
<b>9</b>	2164,10	2113,80	10,14	11,64	939,98	2,38%	1,68
<b>10</b>	2166,10	2101,70	10,14	11,63	939,17	3,06%	1,76
<b>11</b>	2161,80	2102,30	10,12	11,62	934,67	2,83%	2,24
<b>12</b>	2161,50	2101,20	10,12	11,60	933,06	2,87%	2,40

Fuente: Elaboración propia





### 4.3.4. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS CON SUELO RECICLADO MÁS CEMENTO PORTLAND MÁS ADITIVO

Se logró encontrar la proporción óptima de cemento Portland y aditivo, logrando incrementar su resistencia y durabilidad del suelo, para el segundo enfoque.

- El ensayo relación humedad-densidad seca se realizó con suelo reciclado, cemento y aditivo en diferentes porcentajes, se obtuvo los siguientes resultados de densidad máxima y humedad óptima.

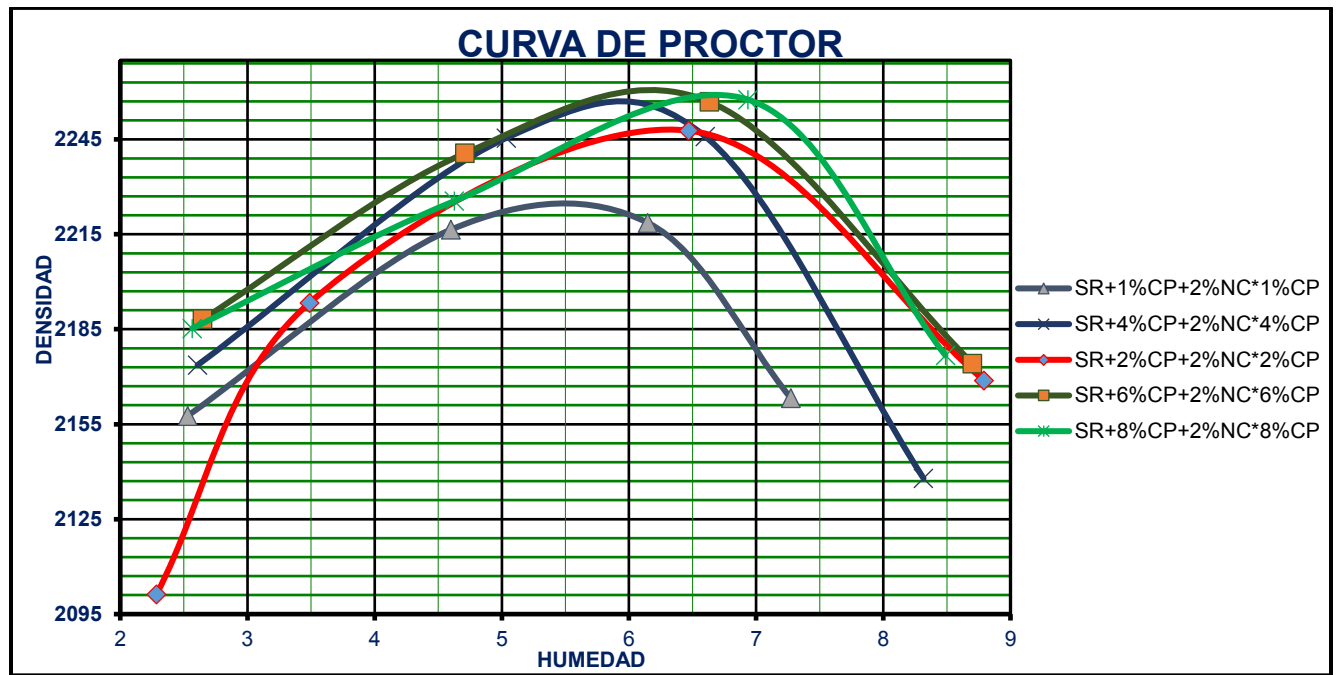


Gráfico 10. Curva de Compactación

Fuente: Elaboración propia

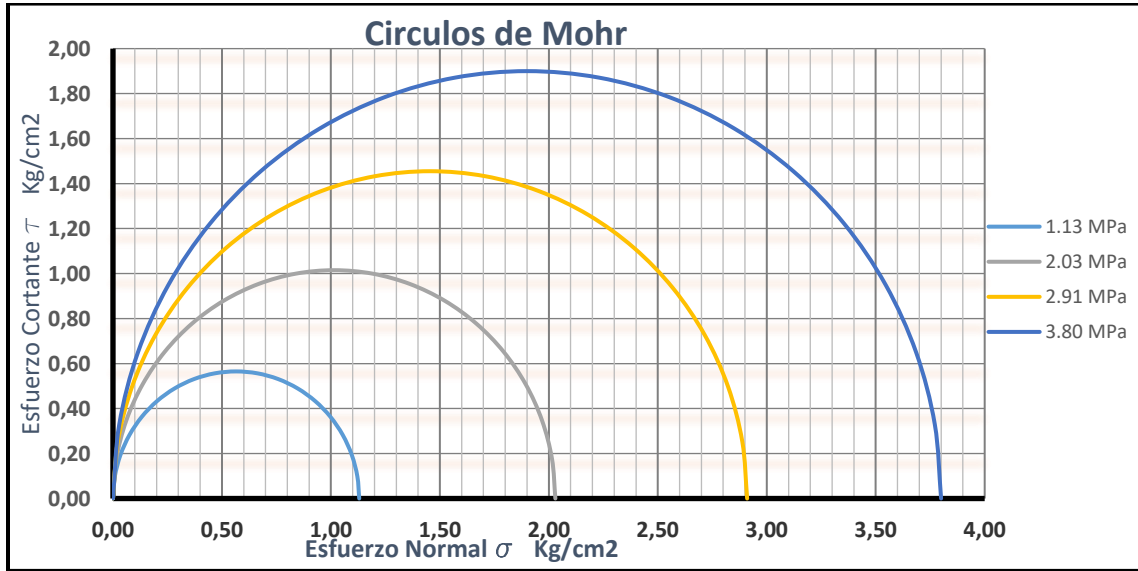
Tabla 78. Densidad Máxima y Humedad Óptima a diferentes porcentajes de cemento más el aditivo

Material Reciclado-Cemento	Densidad máxima (Kg/m <sup>3</sup> )	Humedad Óptima (%)
Suelo reciclado + 1% Cemento + 2% NovoCrete*1%Cemento	2226	5,00
Suelo reciclado + 2% Cemento + 2% NovoCrete*2% Cemento	2254	5,20
Suelo reciclado + 4% Cemento + 2% NovoCrete*4% Cemento	2254	5,40
Suelo reciclado + 6% Cemento + 2% NovoCrete*6% Cemento	2259	5,70
Suelo reciclado + 8% Cemento + 2% NovoCrete*8% Cemento	2261	6,00

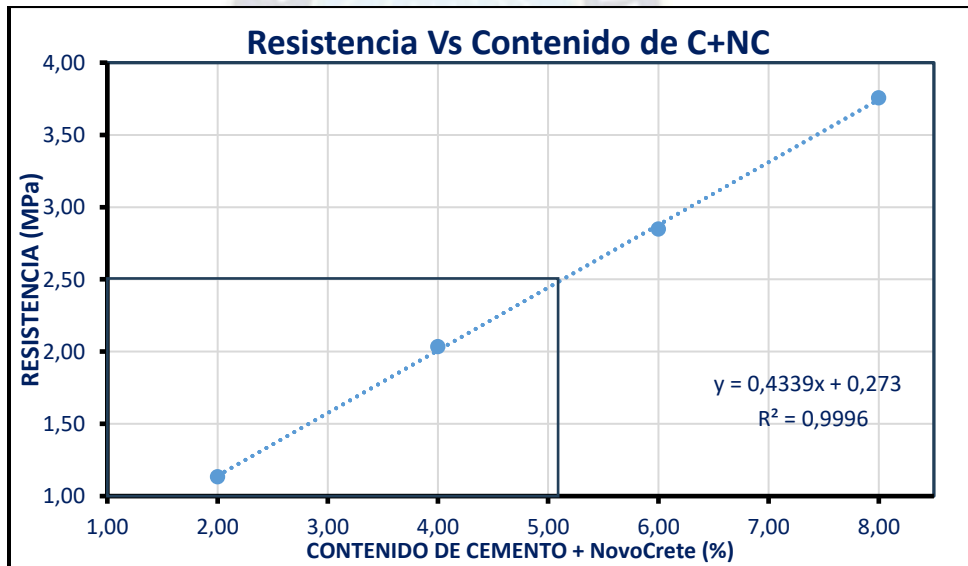
Fuente: Elaboración propia

- Con la obtención de las humedades óptimas, se realizaron probetas para obtener la gráfica de resistencia a la compresión vs. contenido de Cemento más aditivo.

Suelo reciclado + %Cemento Portland + %NovoCrete (**Resistencia**)



**Gráfico 11.** Círculos de Mohr y Envolvente de Falla  
Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 12.** Resistencia a la compresión Vs Contenido de Cemento más NovoCrete  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 79.** Resistencia Vs Contenido de Cemento más NovoCrete

Contenido de Cemento+NovoCrete (%)	Tensión Rotura (MPa)
2,00	1,13
4,00	2,03
5,10	2,50
6,00	2,91
8,00	3,80

Fuente: Elaboración

Se determinó que el contenido óptimo de cemento y aditivo, cumpla con la resistencia mínima de 2,5 MPa.

Por lo tanto, se realizó una línea de tendencia mediante la regresión lineal.

Dado que el contenido óptimo total (Cemento Portland y Aditivo) es 5,10%, para una resistencia de 2,5MPa

Se determinó el porcentaje exacto de cemento y aditivo, el cual fue de 5,00% CEMENTO PORTLAND y 2% ADITIVO (NovoCrete) respecto al cemento.

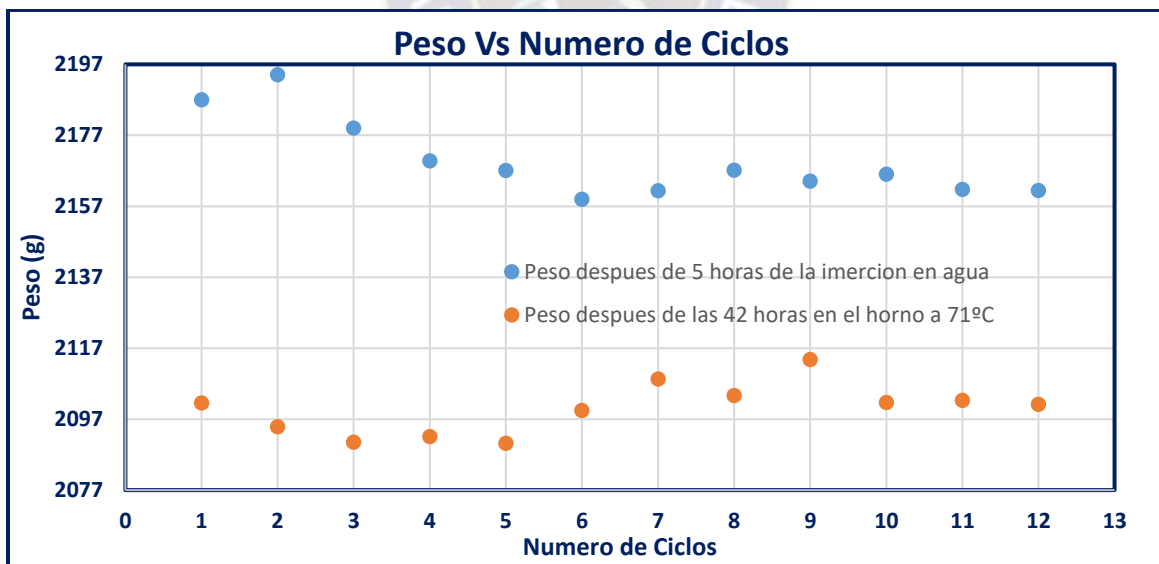
**☞ SUELO RECICLADO + %CEMENTO PORTLAND + %NOVOCRETE (Durabilidad)**

El ensayo de durabilidad permite determinar las pérdidas, cambios de humedad y los volumétricos (Expansión y Contracción), se procedió a la elaboración de probetas con el porcentaje óptimo de cemento y aditivo, lo que dio como resultado.

**Tabla 80.** Resultados de Durabilidad

Material	Contenido de Cemento	Contenido de NovoCrete	Perdida de Suelo - Cemento	Cambios de Volumen de Suelo - Cemento	Norma Invias
Granular	5,0%	2%	2,467	2,400	CUMPLE

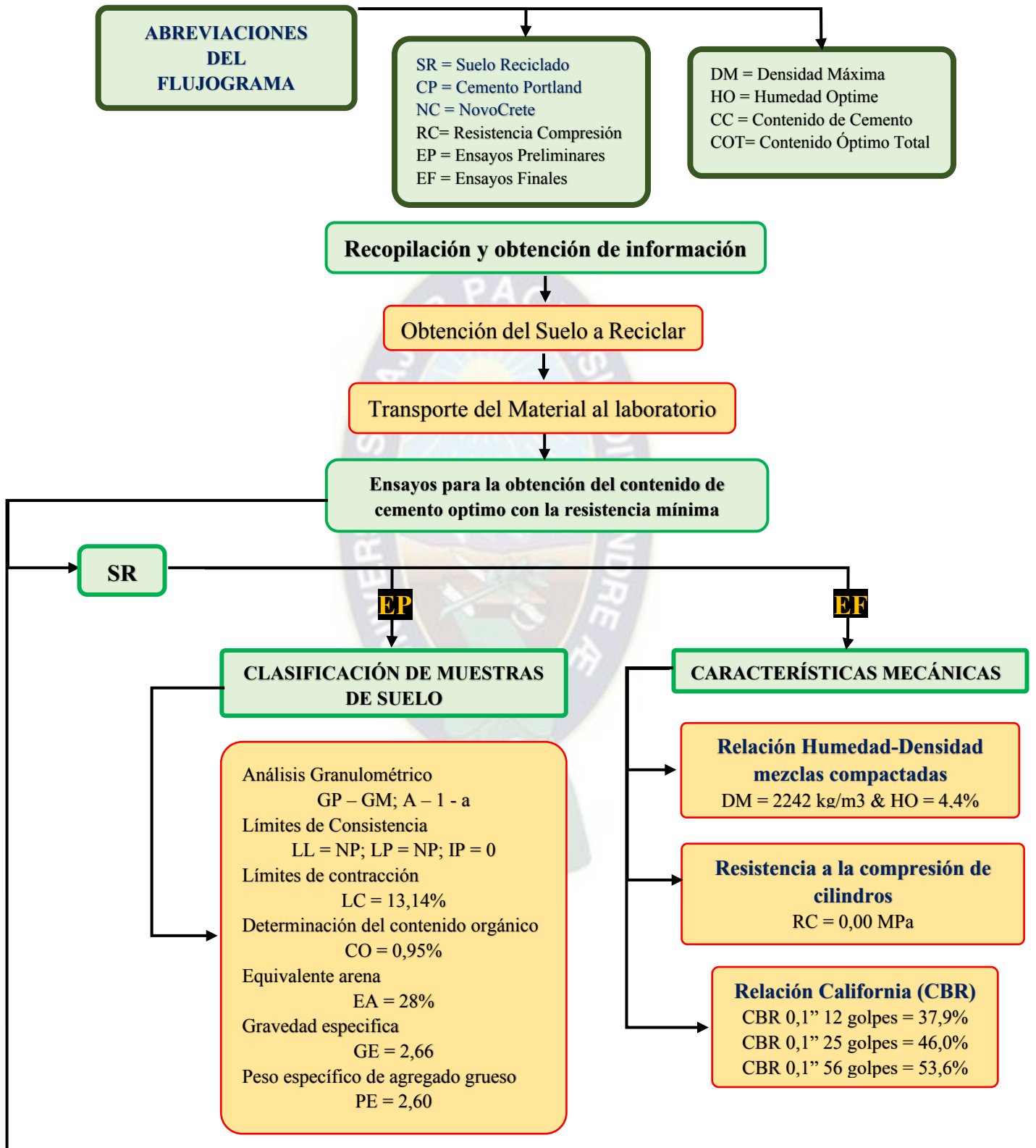
Fuente: Elaboración propia

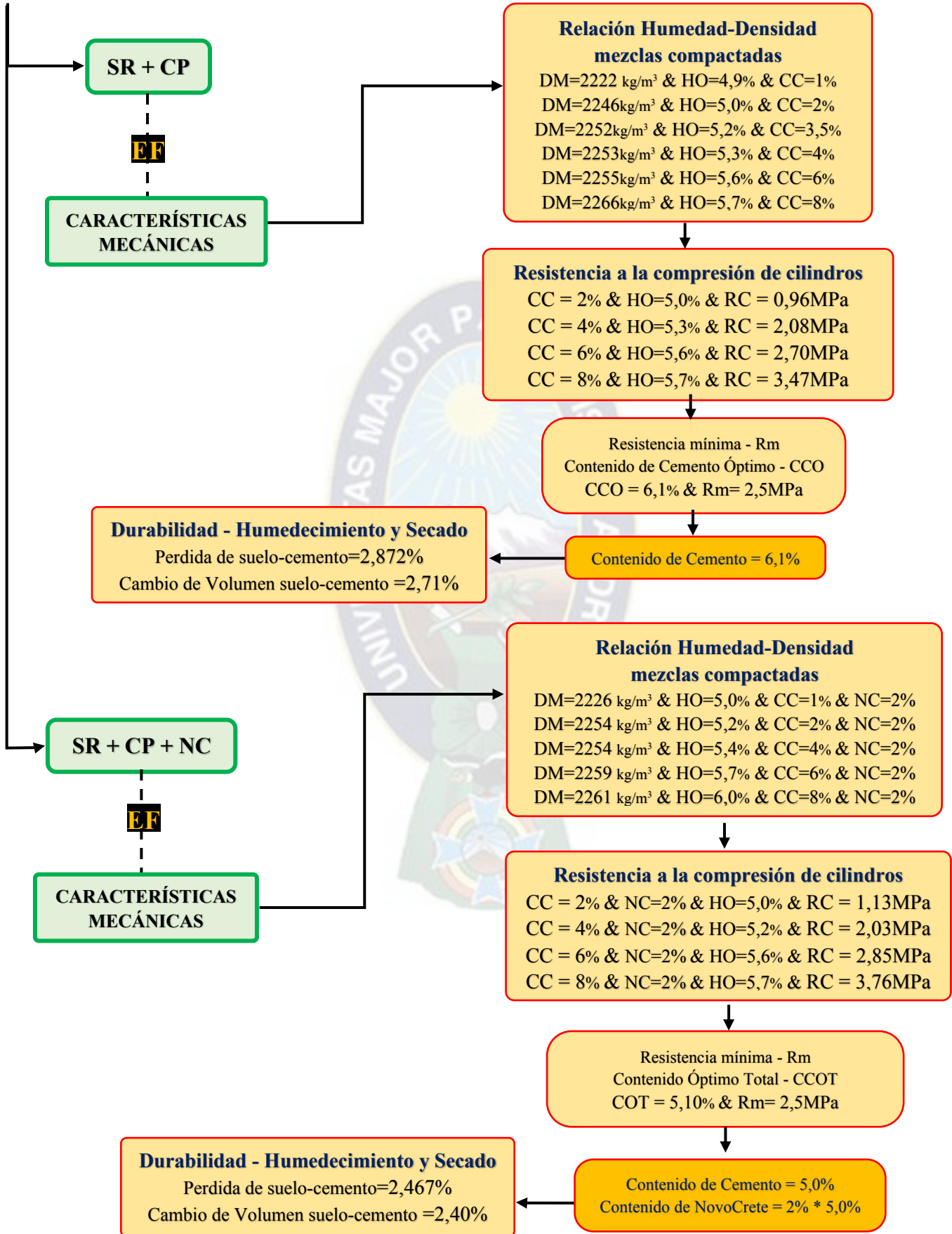


**Gráfico 13.** Peso Vs Numero de Ciclos (SR+5,0ÓptimoCP+2%NC\*5,0Óptimo CP)

Fuente: Elaboración propia

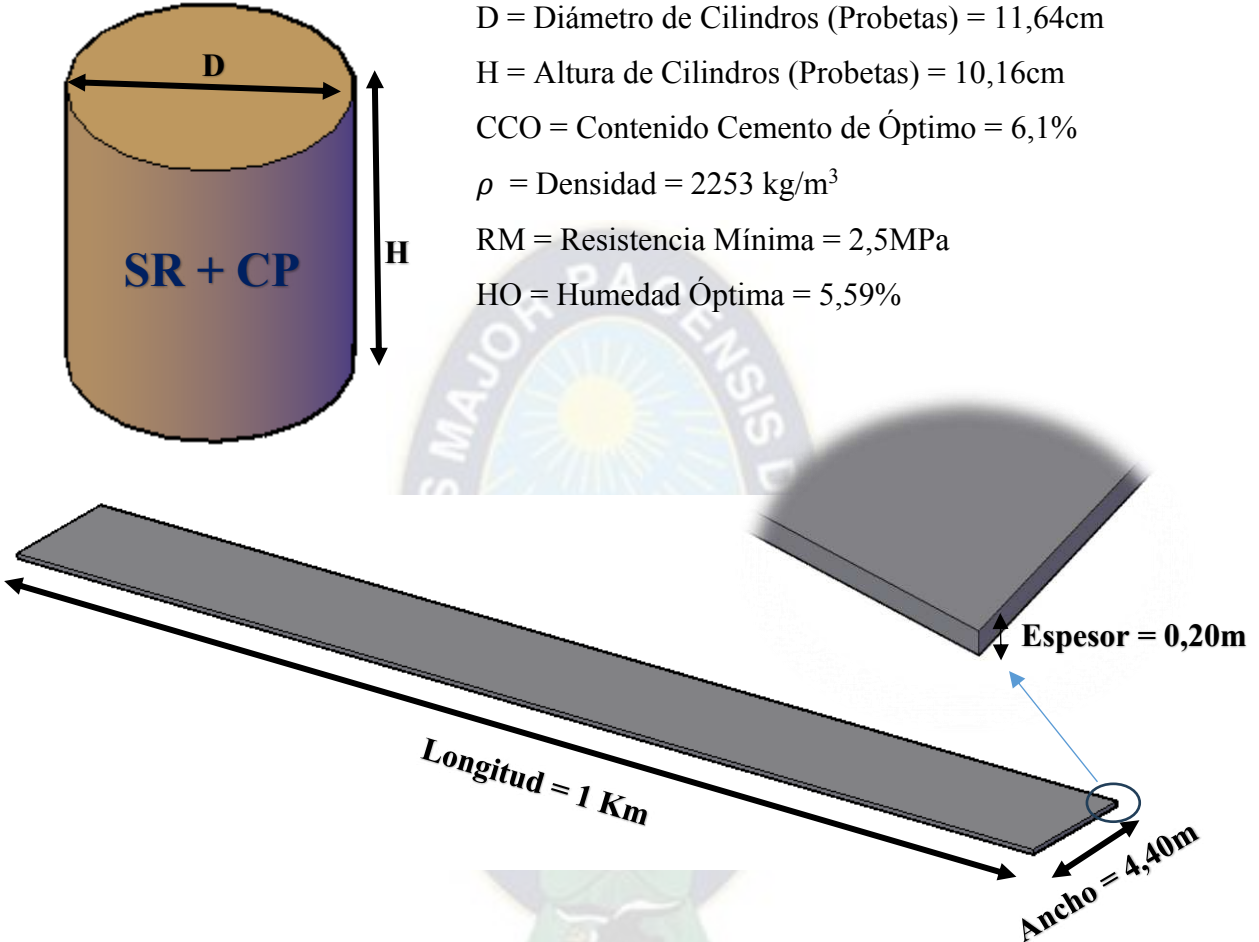
**4.4. FLUJOGRAMA DE RESULTADOS**





#### 4.5. ESTIMACIÓN DE CANTIDADES DE LOS AGENTES QUÍMICOS (Cemento Portland y NovoCrete)

##### 4.5.1. Material Reciclado con Cemento



D = Diámetro de Cilindros (Probetas) = 11,64cm

H = Altura de Cilindros (Probetas) = 10,16cm

CCO = Contenido Cemento de Óptimo = 6,1%

$\rho$  = Densidad = 2253 kg/m<sup>3</sup>

RM = Resistencia Mínima = 2,5MPa

HO = Humedad Óptima = 5,59%

$$\text{masa reciclada} = \rho * (\text{Ancho} * \text{Longitud} * \text{Espesor})$$

$$\text{masa reciclada} = 2253 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (4,40\text{m} * 1000\text{m} * 0,20\text{m})$$

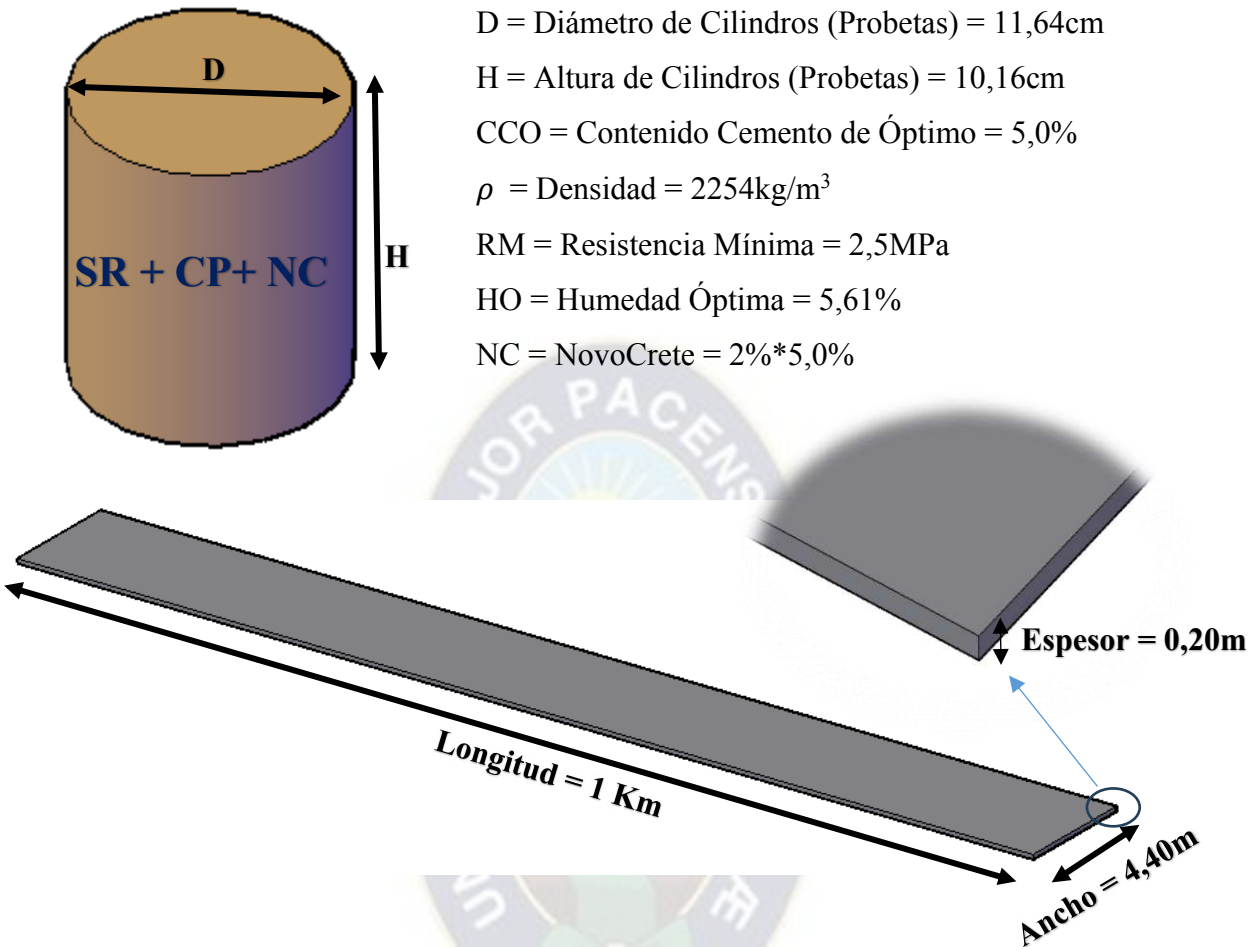
$$\text{masa reciclada} = 1982640,0 \text{ kg}$$

$$\text{masa de cemento} = \text{masa reciclada} * \text{Contenido Cemento de Óptimo}$$

$$\text{masa de cemento} = 1982640 \text{ kg} * \frac{6,10}{100}$$

$$\text{masa de cemento} = 120941,0 \text{ kg}$$

**4.5.2. Material Reciclado con la Combinación de Cemento y NovoCrete**



D = Diámetro de Cilindros (Probetas) = 11,64cm

H = Altura de Cilindros (Probetas) = 10,16cm

CCO = Contenido Cemento de Óptimo = 5,0%

$\rho$  = Densidad = 2254kg/m<sup>3</sup>

RM = Resistencia Mínima = 2,5MPa

HO = Humedad Óptima = 5,61%

NC = NovoCrete = 2%\*5,0%

$$\text{masa reciclada} = \rho * (\text{Ancho} * \text{Longitud} * \text{Espesor})$$

$$\text{masa reciclada} = 2254 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (4,40\text{m} * 1000\text{m} * 0,20\text{m})$$

$$\text{masa reciclada} = 1983520 \text{ kg}$$

$$\text{masa de cemento} = \text{masa reciclada} * \text{Contenido Cemento de Óptimo}$$

$$\text{masa de cemento} = 1983520 \text{ kg} * \frac{5,0}{100}$$

$$\text{masa de cemento} = 99176 \text{ kg}$$

$$\text{masa de NovoCrete} = \text{masa reciclada} * \text{Contenido Cemento de Óptimo} * \text{Contenido de NovoCrete}$$

$$\text{masa de NovoCrete} = 1983520 \text{ kg} * \frac{5,0}{100} * \frac{2}{100}$$

$$\text{masa de NovoCrete} = 1984 \text{ kg}$$

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Se determinó que el reciclado profundo, mediante la incorporación de cemento Portland y aditivo, otorga los resultados más favorables. Al analizar un reciclado con cemento Portland convencional a un reciclado con cemento Portland y aditivo utilizando el mismo porcentaje de cemento Portland, se puede constatar un aumento del 15% en la resistencia, junto con la reducción del 15% en la durabilidad, lo que indica un comportamiento superior del pavimento reciclado. Esta técnica no solo mejora la cohesión y la capacidad de carga, sino que también prolonga la vida útil del pavimento, reduce la necesidad de mantenimiento y disminuye el impacto ambiental al reutilizar materiales existentes. Por lo tanto, se concluye que el reciclado profundo, con la incorporación de cemento Portland y aditivo (NovoCrete), ofrece una solución viable y eficiente para el desarrollo de infraestructuras viales sostenibles.

- Se determinaron las cantidades de cemento y aditivo para los enfoques planteados, con el fin de alcanzar una resistencia mínima de 2,5 MPa, a los siete días de maduración.
- En el primer enfoque, suelo reciclado con cemento. Se logró obtener un contenido de cemento del 6,10% en peso respecto al suelo a reciclar.

Lo cual en la práctica equivale a 28 kg cada 1,0 m<sup>2</sup>, para un espesor de 0,20 m.

#### Estimación de cantidades para un kilómetro de carretera

	Material	Longitud (km.)	Ancho (m.)	Espesor (m.)	Suelo Reciclado (Kg.)	Cemento Portland (Kg.)	Aditivo NovoCrete (Kg.)
<b>PRIMER ENFOQUE</b>	<b>Suelo reciclado Cemento</b>	1,00	4,4	0,2	1982640,00	120941,00	0,00

- En el segundo enfoque, suelo reciclado con cemento y aditivo. Se logró obtener un contenido óptimo total de 5,10% en peso respecto al suelo a reciclar, los porcentajes exactos son, 5,0% Cemento y 2% de aditivo con relación al porcentaje de cemento.

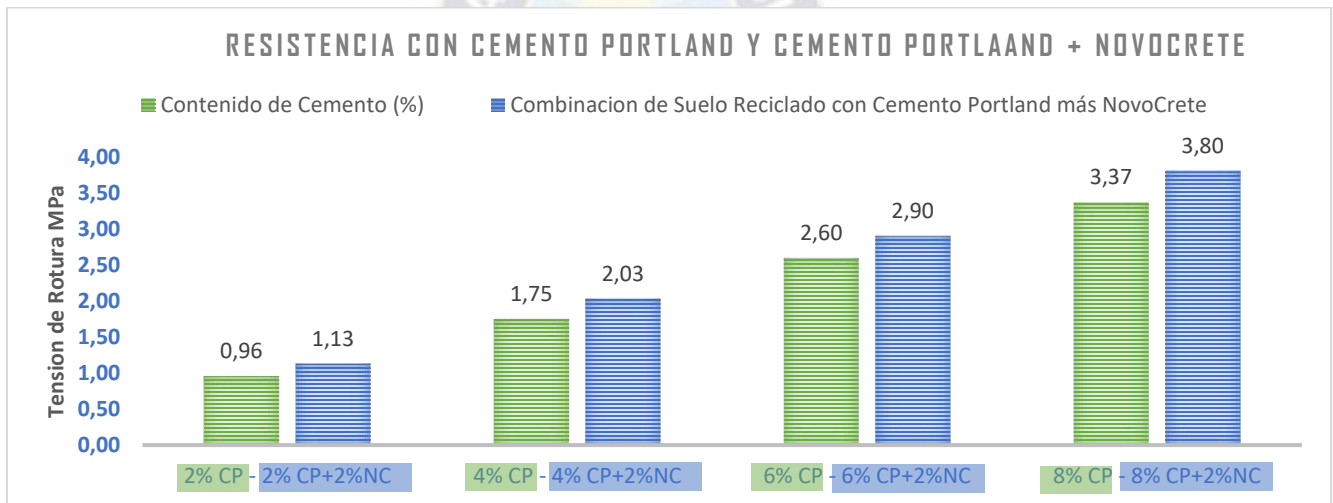
Lo cual en la práctica equivale a 23 Kg de cemento y ½ kg de aditivo cada 1,0 m<sup>2</sup>, para un espesor de 0,20 m.



**Estimación de cantidades para un kilómetro de carretera**

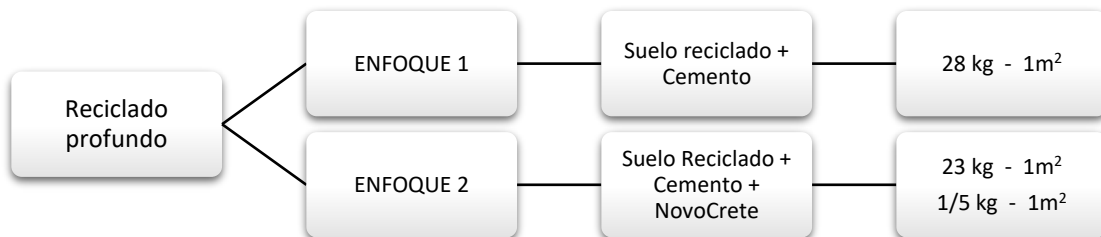
Material	Longitud (km.)	Ancho (m.)	Espesor (m.)	Suelo Reciclado (Kg.)	Cemento Portland (Kg.)	Aditivo NovoCrete (Kg.)
<b>SEGUNDO ENFOQUE</b> Suelo reciclado Cemento Aditivo	1	4,4	0,2	1983520,00	99176,00	1984,00

- La industria requiere una amplia experiencia debido a que se están generando nuevos productos. Dado que no se puede esperar que un único agente químico sea el más adecuado para todas las aplicaciones, es imperativo fomentar la innovación. Con la combinación de cemento Portland y el aditivo NovoCrete, se puede apreciar la relevancia de estos productos.



Como se puede apreciar en la gráfica previa, se ha logrado una mejora, con el incremento en la resistencia de un reciclado con cemento convencional a un reciclado con cemento y aditivo del 15%, con un 30% de reducción en los costos.

Se puede inferir que la opción más adecuada para el reciclado de pavimento flexible corresponde al Segundo Enfoque.



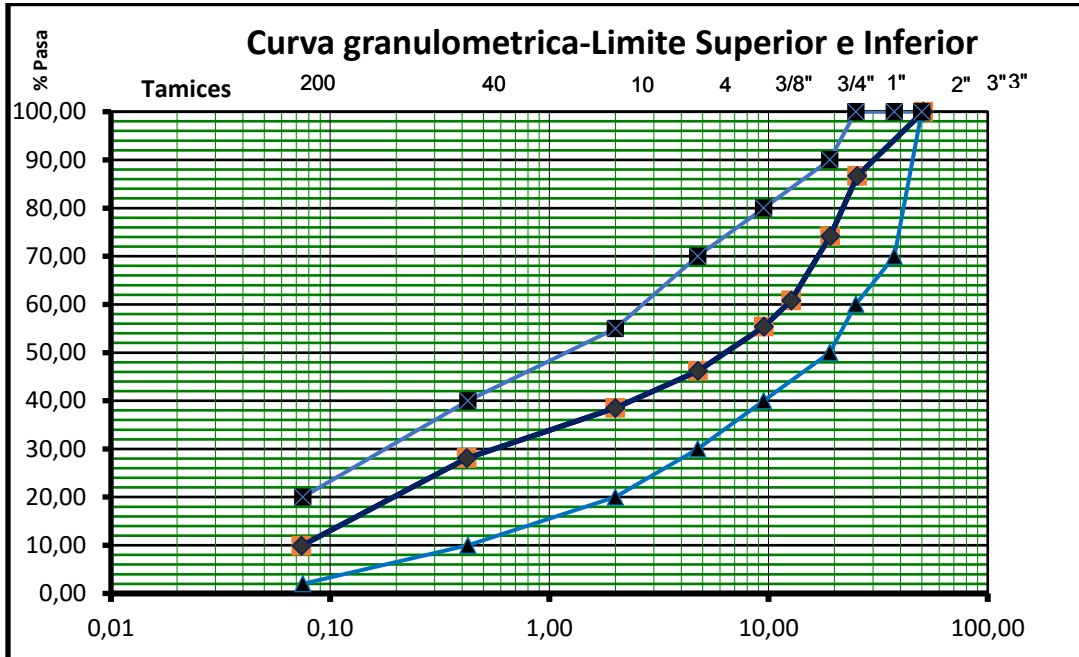
Con las actuales exigencias ambientales y el agotamiento de recursos en algunos sitios de las regiones con la combinación de cemento Portland y aditivo, se logra la reducción de costos de mantenimiento, tiempo de construcción, maquinaria para el reciclado, reducción del personal, prefisuración o fisuración controlada y reemplazo de la capa de rodadura convencional por un MicroPavimento.

En resumen, estos resultados resaltan la relevancia de tener en cuenta los porcentajes de cemento Portland con la incorporación del aditivo NovoCrete para mejorar las propiedades del suelo.

- Se realizó el ensayo de **durabilidad de suelo-cemento**. En el primer enfoque, el contenido óptimo de cemento, que es de 6,10% donde la pérdida de peso dio 2,9%. En el segundo enfoque, el contenido óptimo de cemento es de 5,00 y el contenido óptimo del aditivo NovoCrete es de 2% respecto al cemento, la pérdida de peso es de 2,46. Concluyendo con los resultados, se observa que sí existe una disminución de pérdida de peso con el aditivo NovoCrete.

Material	Perdida de Suelo -Cemento	Cambios de Volumen de Suelo -Cemento	Norma Invias
Suelo reciclado Cemento	2,872	2,71	CUMPLE
Suelo reciclado Cemento Aditivo	2,467	2,40	CUMPLE

- Se determinó las propiedades físicas, dando como resultado lo siguiente en el ensayo de **Granulometría por Tamizado** (Gravas 55,37%, Arenas 38,51%, Finos 9,89%). La granulometría del material para reciclar se debe ajustar a la franja granulométrica Tipo A – 50 (Tabla 9).  
Dando con un material apto para un reciclado.



- Se realizó el ensayo de **Límite de Consistencia**, en el cual se obtuvieron los siguientes resultados (Límite Líquido = NP, Límite Plástico = NP, IP = NP, IG = 0). El material reciclado dio como resultado un límite plástico bajo, el cual indica una mayor capacidad para soportar cargas sin deformaciones excesivas.
- Se realizó el ensayo de **contenido orgánico de un suelo, mediante el ensayo de pérdida por ignición**, se obtuvo el siguiente resultado de 0,95% Material Orgánico, El proyecto tiene limitaciones, las cuales son;

Características	Artículo INV E 350-13	Resultados de ensayos	Observación
Límite líquido % máximo	30	NP	Cumple
Índice de plasticidad % máximo	12	NP	Cumple
Contenido de material orgánico % máximo	1	0,95	Cumple

- Se determinó otros ensayos como el **Límite de Contracción**, donde se obtuvieron los siguientes resultados (LC=13,24%)
- El **Equivalente Arena** es usado para detectar excesiva cantidad de arcillas, finos plásticos y polvo, con equivalente arena que sobrepase el 30%, será apto para un reciclado con éxito, un equivalente de arena de 20% a 30% dependerá mucho de la habilidad de impermeabilizar, donde se obtuvo el siguiente resultado (E.A. 28%)

- La **Gravedad Específica de las partículas sólidas** (Gs 2,66) en general, los suelos presentan valores de Gs comprendidos entre 2,5 y 3,1 el cual se encuentra dentro del rango
- El **Peso específico de agregado grueso** donde se obtuvieron los siguientes resultados (Gs 2,482 AB 4,935%).
- Con los resultados anteriores se realizó la **Clasificación del tipo de suelo**, donde se obtuvieron los siguientes resultados (AASHTO A-1-a; Fragmentos de roca, gravas y arenas, SUCS GP-GM; Grava mal graduada con limo y arena)
- Posteriormente, se determinó las propiedades mecánicas del suelo reciclado, dando como resultado lo siguiente,

**Relación humedad-densidad de la mezcla compactadas** (Densidad máxima 2242 kg/m<sup>3</sup>, humedad óptima 4,4%), así pudiendo realizar el ensayo de **Resistencia a la compresión de cilindros moldeados** observando que los cilindros no tienen cohesión debido a que las probetas realizadas solo con suelo natural fueron sumergidas durante 4 horas como indica, se desintegraron en su totalidad, no pudiendo realizar el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros moldeados ni el ensayo de durabilidad.

Posteriormente, se realizó el ensayo de **Relación California** dando como resultado (CBR 54%),

De esta manera, se determinó la aplicación de reciclado profundo con la combinación de cemento y aditivo NovoCrete.

- Se realizó el análisis de las propiedades mecánicas con la adición de cemento con los diferentes porcentajes, se obtuvo la humedad óptima, dando como resultado lo siguiente.

**Relación humedad-densidad de la mezcla compactada de suelo – cemento**

<b>Material Reciclado-Cemento</b>	<b>Densidad máxima (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Humedad Óptima %</b>
Suelo Reciclado + 1% Cemento	2222	4,90
Suelo Reciclado + 2% Cemento	2246	5,00
Suelo Reciclado + 3,5% Cemento	2252	5,20
Suelo Reciclado + 4% Cemento	2253	5,30
Suelo Reciclado + 6% Cemento	2255	5,60
Suelo Reciclado + 8% Cemento	2266	5,70

- Se realizó el análisis de las propiedades mecánicas con la adición de cemento y aditivo NovoCrete en 2% respecto al porcentaje del cemento, obteniendo la humedad óptima, dando como resultado lo siguiente

***Relación humedad-densidad de la mezcla compactada de suelo – cemento - NovoCrete***

<b>Material Reciclado-Cemento-NovoCrete</b>	<b>Densidad máxima (Kg/m3)</b>	<b>Humedad Óptima %</b>
Suelo reciclado + 1% Cemento + 2% NovoCrete*1%Cemento	2226	5,00
Suelo reciclado + 2% Cemento + 2% NovoCrete*2% Cemento	2254	5,20
Suelo reciclado + 4% Cemento + 2% NovoCrete*4% Cemento	2254	5,40
Suelo reciclado + 6% Cemento + 2% NovoCrete*6% Cemento	2259	5,70
Suelo reciclado + 8% Cemento + 2% NovoCrete*8% Cemento	2261	6,00



## 5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar diversos tipos de cemento que se encuentren disponibles en el mercado.

Se recomienda utilizar el aditivo para diferentes tipos de suelo y ver el comportamiento de los mismos

Se recomienda para la aplicación de reciclado de pavimento con cemento y aditivo, se debe realizar bajo especificaciones técnicas.

Se recomienda, en el estudio de muestras de suelo en campo, recolectar cantidades teniendo en cuenta los tipos de ensayo a realizar, por ejemplo:

- Clasificación de suelo 30 kg por ensayo.
- Proctor y CBR 60 kg por ensayo.
- Compresión 10 kg por ensayo.
- Durabilidad 10 kg por ensayo.

Se recomienda que los ensayos más destacados para un reciclado de pavimento son la resistencia a la compresión y durabilidad, ya que los valores de CBR saldrán mayores a 100% por la rigidez que tienen estos.

Se recomienda utilizar equipos y mano de obra calificada que garanticen una mezcla correcta de material, así como una disgregación adecuada.

Se recomienda para el curado de los cilindros moldeados, se empleen equipos que permitan mantener la humedad.

## **CAPITULO VI**

### **6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Administradora Boliviana de Carreteras (2011) Manual de ensayos de suelos y materiales asfaltos.

Adrián Herrera Acevedo (2007) Recuperación de pavimentos con cemento en obra. México.

Administración Boliviana de Carreteras A.B.C. (2008). Manual de Ensayos de Suelos y Materiales-Suelos. La Paz, Bolivia

Administración Boliviana de Carreteras A.B.C. (2011). Manual de Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. La Paz, Bolivia

Diego López Castillo (2014) Reciclado de pavimento en carreteras. Perú.

Juan Fernando, ADAME Eduardo y MARCOS Omar Alejandro (2020) Beneficios ambientales de reciclaje de pavimentos. México.

Joel Aguirre (2019). Calles con tecnología verde y de bajo costo. México.

Wirtgen GmbH (2012). Tecnología de reciclagem a frío Wirtgen. Alemania.

INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá

Laura Cardona Pico, Juan Sánchez Gómez (2018). Análisis de una mezcla suelo-cemento con adición de viruta de acero (Trabajo de Grado). Universidad de La Salle. Bogotá

Kevin Luis Reyes (2023). Caracterización de la durabilidad y resistencia del suelo-cemento carretera Mazamari-Llaylla, departamento Junín (Tesis Pregrado). Universidad San Ignacio de Loyola. Lima-Perú

Aldemar Salcedo Torres, Hollman Yair Morales Martínez (2022). Estabilización de suelos sucios utilizando cemento y escorias para el mejoramiento de vías (Trabajo de Grado). Universidad católica de Colombia. Bogotá D.C

Claudia Ximena Granados Muñoz (2020). Guía práctica para la determinación del límite de contracción de los suelos. Universidad Cooperativa de Colombia. Colombia

Jonatan Rodrigo Garci Toro (2019). Estudio de la técnica de suelo-cemento para a estabilización de vías terciarias en Colombia que posean un alto contenido de caolín. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C

Juan Benítez Bustamante (2013). Diagnóstico del estado actual del reciclaje de pavimentos en Colombia y recomendaciones para su implementación efectiva (Proyecto de Grado). Bogotá D.C. (Colombia)

AASHTO asociación americana de funcionarios estatales de carreteras y transporte (1993). Guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimento. Washington

HITEC -ROAD (2005). Tecnología de Estabilización de Suelos adelantada a su tiempo. NovoCrete. Alemania

IECA Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Manual de Reciclado e Firmes In Situ con Cemento. ANTER Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclado de Firmes

Ing. Roger Flores Laura (2016). Reciclado de pavimentos flexibles In Situ con cemento en Bolivia tramo Rio Seco – Desaguadero. FLORES-Servicios de Ingeniería y Construcción.

Bermejo F. Víctor & Pacosillo T. Luis V. (2013). Laboratorio de Mecánica de Suelo I (CIV-219).

Byron Piedra Vargas (2014). Estudio para analizar el ladrillo suelo-cemento o ecológico en cuenca (Trabajo de Grado). Cuenca-Ecuador

American Association of State and Transportation Highway Officials A.A.S.H.T.O. (1998). Diseño de estructuras de Pavimento. United State.

Montejo Fonseca Alfonso. (2002). "Ingeniería de Pavimentos "Tomo II. Evaluación estructural, obras de mejoramiento y nuevas tecnologías. Colombia: Bogotá.

WIRTGEN GMBH (2004). Wirtgen Manual de Reciclado e Frio. Alemania.



---

## **CAPÍTULO VII**

### **7. ANEXOS**

#### **7.1. Ensayos de Caracterización para el Suelo Reciclado**

Es importante cuantificar estas propiedades para predecir cómo se comportará el suelo bajo la carga de campo, para determinar las propiedades del suelo, se requiere realizar varios ensayos de caracterización.

- ✓ Contenido de humedad
- ✓ Análisis Granulometría por tamizado
- ✓ Límites de Consistencia (Límites de Atterberg)
- ✓ Límites de Contracción (método de la parafina)
- ✓ Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición
- ✓ Equivalente de arena
- ✓ Gravedad específica de las partículas sólidas
- ✓ Peso específico de agregado grueso
- ✓ Clasificación del tipo de Suelos
- ✓ Relaciones Humedad-Densidad de mezclas compactadas de Suelo-Cemento
- ✓ Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento)
- ✓ Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento
- ✓ Relación Soporté California CBR

##### **7.1.1. Contenido de Humedad**

###### ***I. NORMA REFERENCIAL***

ASTM D2216

###### ***II. EQUIPO***

- a. Cápsulas
- b. Horno de secado, capaz de mantener una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C
- c. Balanza de 0,01g de precisión
- d. Equipo de manipuleo

###### ***III. MUESTRA A ENSAYAR***

Se debe suministrar una cantidad de material, tal que cumpla con las especificaciones de la siguiente tabla:

**Tabla 81.** Requisitos sobre la masa mínima de los especímenes de ensayo

Tamaño de tamiz		Masa de especímenes	
		Método A	Método B
75,0 mm	3"	5 kg	50 kg
37,5 mm	1 1/2"	1 kg	10 kg
19,0 mm	3/4"	250 g	2,5 kg
9,5 mm	3/8"	50 g	500 g
4,75 mm	No. 4	20 g	100 g
2 mm	No. 10	20 g	20 g

Fuente: ASTM D2216

La norma incluye dos métodos para determinar el contenido de agua, los cuales difieren en el número de cifras significativas.

**MÉTODO A.**- El contenido de agua por masa, se debe registrar con aproximación a 1%. Para casos en que se presente discusión en relación con los resultados, el método A se deberá tomar como referencia.

**MÉTODO B.**- El contenido de agua por masa, se debe registrar con aproximación a 0,1%. Además, se debe asegurar que la muestra mantenga el contenido de humedad del material del cual es representativa.

#### **IV. PROCEDIMIENTO**

Obtener la muestra representativa mediante cuarteo, pesar una cápsula y colocar la muestra, ya antes seleccionada, llevar al horno a la temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta una masa constante. La pérdida de la masa debido al secado se considera que es la masa de agua.

El contenido de agua (contenido de humedad) es calculado utilizando la masa de agua y la masa del espécimen seco.

##### **7.1.2. Análisis Granulométrico por Tamizado**

###### **I. NORMA REFERENCIAL**

AASHTO T27-93.

ASTM D422-63.

###### **II. EQUIPO**

a. Juego de tamices.

- Para agregado grueso (2", 1 ½", 1 ¾", 3/8", N°4, N°10).
- Para agregado fino (N°10, N°20, N°40, N°60, N°140, N°200).
- Mortero y mano de mortero o un pulverizador mecánico de suelo.
- b. Balanza de 0,01g de precisión para muestras de hasta 200 g de peso y de 0,1g de precisión para muestras de más de 200g de peso.
- c. Cacerolas
- d. Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110±5 °C.
- e. Tamizador automático
- f. Cuarteadores
- g. Equipo de manipuleo

### III. MUESTRA A ENSAYAR

El tamaño de la muestra depende del tipo de suelo:

**Tabla 82.** Peso de la muestra requerida según el tamaño máximo de partículas

Tamaño máximo de la partícula /mm	Tamiz	Masas de muestra mínima /g
9,5	3/8"	500
19	3/4"	1000
25	1"	2000
38	1 1/2"	3000
50	2"	4000
75	3"	5000

**Fuente:** Ing., Msc Víctor E. Bermejo - Ing. Mg Luis P. Ticona (2006).

También el tamaño de la muestra varía entre 1500g, para gravas con partículas máximas de 19mm hasta 5000g para materiales cuya partícula máxima tenga 75mm.

- **Sin lavado:** comúnmente se realiza por fines prácticos cuando el tipo de suelo es de predominancia gruesa o el lavado es innecesario cuando solo 5 a 10% pasa a través de tamiz No 100. Empleando la serie de tamices completa.
- **Con lavado:** por el contrario, este método es más confiable cuando se tiene muestras con material fina adherida, por lo que es imprescindible separar la muestra en dos partes una parte gruesa y la otra fina

La serie fina (mortero de suelo) corresponde a la serie de tamices (N°10, N°20, N°40, N°60, N°140, N°200). Para el cual la muestra debe ser directamente lavado a

través del tamiz N°200, de tal forma de liberarse de la materia fina adherida. La cantidad de muestras normalmente es de 100-115g.

#### **IV. PROCEDIMIENTO**

##### **— Sin lavado**

- a. Seleccionar una cantidad de muestras representativa según la tabla anterior, teniendo simplemente el cuidado de tomar la muestra de diferentes sitios.
- b. Rompa los terrones del material con el rodillo sobre una superficie limpia y lisa, pulverice el material fino con el mazo de goma.
- c. Secar el suelo en el horno a una temperatura constante de  $110 \pm 5$  °C. Si es necesario rompa los terrones con el mazo de goma.
- d. Pese la muestra una vez que este fría y anote en el registro, determinar el peso del recipiente vacío.
- e. Traslade la muestra al juego de tamices (serie de tamices gruesas) con la bandeja asegurada en la parte inferior. Una serie típica recomendable sería, dependiendo del tamaño máximo de agregado utilizando. Coloque la tapa superior y agite el juego vigorosamente con un movimiento de rotación horizontal. Los tamices se golpean de vez en cuando, dejándoles caer suavemente. El periodo de agitación depende de la cantidad de material fino que hay en la muestra, no será menor de 15 minutos aun para los suelos de granos muy finos. Dependiendo de la cantidad de finos, se empleará la serie completa.
- f. Pasar el material retenido del tamiz más grueso al platillo de la balanza y pesar. Coloque el material en un recipiente y guarde hasta terminar el ensayo
- g. Repita el procedimiento en los sucesivos tamices más finos. Pequeñas partículas de piedra que quedan retenidas en los alambres del tamiz no deben ser forzadas para pasar a través de la malla, remover con la mano e incluidas con su fracción antes de pesar. Los tamices finos se vierten sobre el platillo de la balanza y se pasa una brocha para hacer caer todo el material retenido.

##### **— Con lavado:**

- a. Emplear la serie (N°10, N°20, N°40, N°60, N°140, N°200).
- b. Pese la muestra en una cacerola.

- c. Pese una fracción de muestra de 100g que pase el tamiz N°10 y se retenga en el tamiz N°200 previo procedimiento.
- d. Pase la muestra a una cacerola, llénela con agua suficiente para cubrir el material y deje que remoje hasta que se desintegre completamente. Esto puede demorar de 2 a 12 horas.
- e. Agite bien la muestra con los dedos y luego con cuidado vierta el agua turbia a través del tamiz N°200 hasta que el agua de enjuague quede limpia
- f. El material retenido debe ser cuidadosamente vertido en el recipiente previamente pesado. Se debe tener cuidado de no dejar partículas del suelo en la malla del tamiz
- g. Seque al horno la muestra lavada y vuelva a pesar
- h. Realice el análisis usando tamices de la serie fina en la misma forma indicada en los pasos (e, f y g).

### **7.1.3. Límites de Consistencia del Suelo (Límites de Atterberg)**

#### ***I. NORMA REFERENCIAL***

AASHTO T90-70. - ASTM D424-59.

ASTM D423-66

#### ***II. EQUIPO***

##### **— Límite líquido**

- a. Aparato de límite líquido de Casagrande
- b. Tamiz N°4
- c. Mortero
- d. Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ .
- e. Ranurador ASTM
- f. Balanza de 0,01g de precisión
- g. Cápsulas o recipientes
- h. Equipo de manipuleo

##### **— Límite plástico**

- a. Agua destilada o desmineralizada
- b. Placa de vidrio esmerilado
- c. Cápsulas o recipientes

- d. Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ .
- e. Balanza de 0,01g de precisión
- f. Equipo de manipuleo

### **III. MUESTRA A ENSAYAR**

#### **— MUESTREO HÚMEDO**

Muestra que pasan el tamiz N°40, con 150 a 200g. Así, guardar la mezcla en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejar reposar al menos de 16 horas.

Muestras que contienen material retenido en el tamiz N°40. Seleccionar una cantidad de 150 a 200g aproximadamente con contenido de humedad natural que pase N°40. Cuando la muestra contenga considerablemente porcentajes considerables de material retenido en el tamiz N°40 utilizar cantidades no mayores a 500 gramos.

#### **— MUESTREO SECO**

Seleccione la cantidad de muestra que garantice de 150 a 200g de material que pase el tamiz N°40. Secar la muestra a temperatura ambiente o en un horno que no exceda los  $60^\circ\text{C}$

Pulverizar la muestra en un mortero de tal manera que no se rompan las partículas individuales. Separar la muestra sobre el tamiz N°40 agitándola a mano.

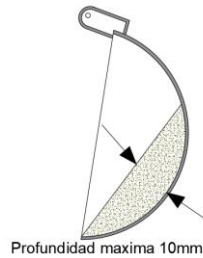
Colocar la muestra en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejar reposar por lo menos 16 horas

### **IV. PROCEDIMIENTO**

#### **— Límite líquido**

Tomar una muestra que pase el tamiz N°40 colocar en una cápsula con agua destilada hasta que la muestra no sea líquida, la cual tenga un aspecto seco, pero con humedad. Cubrir la porción preparada, pasado las 16 horas, se podrá realizar el ensayo.

Colocar la porción preparada en la copa del aparato del límite líquido (casa grande) presionarla hacia abajo y dispersarla dentro de la copa hasta una profundidad de aproximadamente 10mm. Se debe tener cuidado en eliminar las burbujas de aire presentes en la muestra.



**Figura 71.** Colocación de la muestra en el aparato de Casagrande  
**Fuente:** Elaboración Propia

Con el ranurador, formar una ranura en la muestra dentro del aparato de Casagrande. Al utilizar la herramienta (ranurador) se debe tener cuidado en que esta permanezca perpendicularmente a la superficie de la copa en el momento del corte.



**Figura 72.** Corte con el ranurador  
**Fuente:** Geotecnia con Énfasis en Suelos

Levantar y dejar caer la copa girando la manivela del aparato a una velocidad de 1,9 a 2,1 caídas por minuto hasta que las dos mitades de la muestra entren en contacto a una distancia de 13mm. Si después de varios intentos la muestra sigue deslizándose o si el número de golpes para cerrar la ranura es siempre menor a 25 golpes, registrar que el límite líquido no puede ser determinado y reportar el suelo como no plástico.

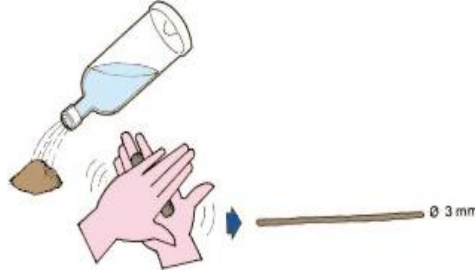
Volver a mezclar toda la muestra guardada agregando agua destilada para incrementar el contenido de humedad del suelo y consecuentemente disminuir el número de golpes requerido para cerrar la ranura. Uno de los ensayos deberá entrar entre 25 a 35 golpes, otro entre 20 a 30 y el último entre 15 a 25 golpes.

Determinar el contenido de humedad de las muestras correspondiente a cada número de golpes

#### — Límite plástico

Seleccionar 20 gramos de la muestra preparada del límite líquido. Reducir el contenido de humedad hasta una consistencia en la cual esta puede ser enrollada sin adherirse a la mano. Para ello se puede mezclar y esparcir la muestra sobre la placa de vidrio

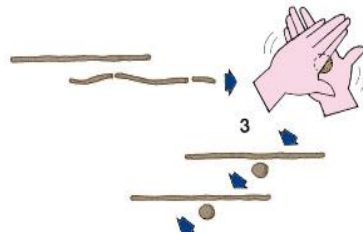
De la porción de 20 gramos, seleccionar aproximadamente 1,5 a 2,0g y formar con este una masa terrones elipsoidales, enrollar la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio, el cual deberá alcanzar un diámetro uniforme de 3,2mm en dos minutos.



**Figura 73.** Amasado de la muestra  
**Fuente:** Geotecnia con Énfasis en Suelos

Juntar las partes desmenuzadas y colocar en un recipiente.

Repetir los pasos anteriores hasta que el contenedor tenga aproximadamente 6 gramos de suelo y así poder determinar el contenido de humedad de cada una de ellas



**Figura 74.** Muestra que se deberá meter al contenedor  
**Fuente:** Geotecnia con Énfasis en Suelos

#### 7.1.4. Límite de Contracción (método de la parafina)

##### **I. NORMA REFERENCIAL**

ASTM D4943-18

##### **II. EQUIPO**

- a. Vasijas de evaporación
- b. Espátula
- c. Recipiente para contracción
- d. Parafina
- e. Recipiente de virio
- f. Placa de vidrio
- g. Probeta



h. Balanza

i. Horno

### **III. MUESTRA A ENSAYAR**

La muestra se debe realizar siguiendo los lineamientos de la norma.

### **IV. PROCEDIMIENTO**

Se selecciona un recipiente para contracción y se anota el volumen. El cual será el volumen de la pastilla de suelo húmedo, engrasar ligeramente el interior del recipiente, anotar la masa del recipiente vacío.

Se coloca al centro del recipiente una cantidad de suelo húmedo igual o cercana a la tercera parte del volumen de este y se fuerza para que fluya hacia los bordes, golpeándola suavemente sobre una superficie firme y acolchonada, así sucesivamente colocar una porción similar a la anterior y golpear hasta que el recipiente esté lleno.

Se remueve el exceso de suelo en la superficie con la regla metálica y limpiar la superficie externa del recipiente. Así pesar inmediatamente el recipiente de contracción con el suelo húmedo y se anota la masa obtenida.

Se deja la pastilla de suelo al ambiente, hasta que su color cambie de oscuro a claro, luego introducir en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C hasta alcanzar una masa constante y determinar la masa del recipiente más la pastilla de suelo seco.

Una vez obtenida la pastilla de suelo seco, se ata firmemente el hilo de costura alrededor de la pastilla de suelo seco, sumergir la pastilla en la parafina, la cual debe quedar completamente cubierta. No se debe permitir el desarrollo de burbujas en la cubierta de parafina. Si estas aparecen se deberá usar un elemento punzante para llenar los orificios con parafina. Retirando la pastilla de suelo con parafina dejar enfriar y determinar la masa de la pastilla de suelo cubierta de parafina.

Se determina la masa indicada cuando la pastilla de suelo cubierta de parafina está suspendida de la balanza y completamente sumergida en el baño de agua. Se debe tener la certeza de que no haya burbujas de aire adheridas ni a la superficie de la pastilla cubierta de parafina ni a la del hilo. El valor registrado por la balanza se anota como masa en el agua de la pastilla de suelo seco envuelta en parafina

#### **7.1.5. Equivalente de Arena**

##### **I. NORMA REFERENCIAL**

AASHTO T176-79.

ASTM D2419-74.

## **II. EQUIPO**

- a. Probetas de acrílico de 38cm de altura (15’’)
- b. Cápsulas de aluminio
- c. Malla de #4
- d. Pisón el cual tendrá una marca que tiene una longitud desde la punta hasta la marca de 25,4cm peso de 980g
- e. Embudo
- f. Balanza con aproximadamente de 0,5g
- g. Solución de trabajo compuesta de cloruro de calcio, glicerina, formaldehído y agua destilada.
- h. Repisa donde colocar el frasco con la solución del trabajo.
- i. Se tendrán 90mm de solución de trabajo y se completará hasta 1 galón agregándole agua
- j. Cucharón
- k. Charola redonda
- l. Tapones de corcho
- m. Cronometro

## **III. MUESTRA A ENSAYAR**

Se recomienda la toma de material en una cantidad tal que llené un envase con capacidad de aproximadamente 20 litros, rocíe el material para disminuir la segregación y mezclar los agregados uniformemente, en una bandeja 60x60x5 cm en una superficie plana y limpia.

Cuartee el material húmedo utilizando una cuchara de albañil y separe una de las porciones obtenidas por cuarteo, esperar hasta que la porción, pierda humedad para poder cernir por el tamiz N°4

Llenar el envase hasta el borde. El volumen suelto pesará aproximadamente 100 g, que es el peso de la muestra deseable

Coloque esta muestra al horno no mayor a 110°C.

Existen dos tipos de solución

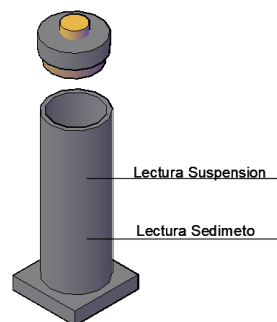
- Solución concentrada
- Solución diluida o Solución para ensayo

La solución para el ensayo consta de 88ml de solución concentrada combinada con 3697ml de agua destilada.

#### **IV. PROCEDIMIENTO**

Después que el material ha sido secado hasta peso constante sáquele del horno mientras la muestra se enfría a temperatura ambiente, vierta la solución del envase a la probeta estándar.

- a. Agregar en la probeta solución de trabajo hasta la marca de 10cm o 4"
- b. Utilizando un embudo vacié la muestra seca a la probeta estándar, haga rodar la probeta a la vez que golpee suavemente el fondo, este movimiento facilita la salida de las burbujas de aire atrapadas entre la solución y la muestra, dejar en reposo durante 10min.
- c. Después de los 10min. de reposo ponga el tapón a la probeta. Agarrar en cada mano un extremo de la probeta y póngase en posición horizontal con una distancia de 20cm, a velocidad de 90 ciclos en 30 segundos, recomendando medir la distancia en el borde de una mesa para guiarse durante la operación de agitado.
- d. Coloque el frasco con la solución para el ensayo a 90cm de altura de la mesa de trabajo. Quite el tapón de la probeta estándar abra el paso del líquido aflojando un poco la pinza y lave el tapón de tal manera que cualquier suelo adherido escurra dentro de la probeta
- e. Introduzca rápidamente el irrigador haciendo girar la probeta.
- f. Retire cuando el irrigador alcance la marca de 15 pulgadas
- g. Dejar la probeta reposar por un periodo de 20min.
- h. Después de este tiempo determinar la altura a la que se encuentra los finos (lectura de arcilla). Anotar la lectura con precisión de una décima de pulgada (0,1")
- i. Después, introducir lentamente el pistón para evitar turbulencias, con la ayuda del pistón se toma a la altura a la que se encuentra las arenas (lectura aparente de arena)



**Figura 75.** Lectura en el cilindro

**Fuente:** Elaboración Propia

### **7.1.6. Gravedad Específica de las Partículas Sólidas**

#### ***I. NORMA REFERENCIAL***

AASHTO T100-70.

ASTM D854-02.

#### ***II. EQUIPO***

- a. Picnómetro con una capacidad mínima de 250 ml. El volumen del picnómetro debe ser 2 o 3 veces el volumen de la muestra húmeda durante la etapa de aireación.
- b. Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.
- c. Balanza de 0,01g de precisión. Con una capacidad de por lo menos 500g cuando se utiliza el picnómetro de 250 ml y 1000 g para el picnómetro de 500 ml.
- d. Desecador conteniendo silica y gel. Se debe verificar que la silica gel presenta el color adecuado.
- e. Termómetro de 0,1 °C de precisión.
- f. Equipo de remoción de aire de las muestras que puede estar constituido por una bomba de vacío o una hornilla capaz de mantener la temperatura adecuada para hervir el agua.
- g. Tamiz N°4
- h. Batidora de suelo
- i. Embudo
- j. Papel absorbente.
- k. Conservadora
- l. Recipiente capaz de contener agua
- m. Trozo de plataforma sobre el cual pueda asentarse el picnómetro.
- n. Equipo de manipuleo
- o. Agua desairada

#### ***III. MUESTRA A ENSAYAR***

##### **— TAMAÑO MÁXIMO DE PARTÍCULA**

La muestra debe ser tamizada a través del tamiz N°4, tomar la porción que pasa por la malla. En caso de que el porcentaje de suelo sea retenido en el tamiz N°4, esta porción deberá ser analizada mediante el procedimiento ASTM C127 u otro equivalente

##### **— CANTIDAD DE MUESTRA**

La masa de la muestra representativa del suelo secado al horno deberá corresponder al rango presentado en la tabla mostrada a continuación.

**Tabla 83.** Masas de muestras recomendadas

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Masa seca de muestra para picnómetro de 250 ml en g</i>	<i>Masa seca de muestra para picnómetro de 500 ml en g</i>
SP, SP-SM	60±10	100±10
SP-SC, SM, SC	45±10	75±10
Limo o Arcilla	35±10	50±10

**Fuente:** Según el tipo de suelo (ASTM 2003)

#### **IV. PROCEDIMIENTO**

##### **— CALIBRACIÓN EL PICNÓMETRO**

Determinar la calibración del picnómetro consiste en la adecuación del equipo a utilizar durante el ensayo. Las superficies interiores del picnómetro deben ser lavadas, asegurándose que las mismas queden libres de grasa e impurezas y escurrir perfectamente hasta eliminar cualquier residuo de agua existente. Se determina el peso del picnómetro limpio y seco, efectuando 5 mediciones (la desviación estándar de los valores debe ser menos o igual a 0,02 gramos)

El promedio de estos valores será registrado como el peso real del picnómetro. El picnómetro se llena con agua destilada y previamente desaireada a temperatura de ensayo (ambiente), hasta rebasar la marca de calibración y posteriormente se deja reposar por algunos minutos. Con el objetivo de alcanzar el equilibrio térmico, el picnómetro, tapón, el termómetro y la pipeta son introducidos a la conservadora por un tiempo mínimo de 3 horas. Tomando el picnómetro por la parte superior del cuello y situándose sobre una superficie firme, se ajusta el nivel de agua utilizando un papel absorbente. Se registra el peso del picnómetro con agua, a temperatura ambiente, con una precisión de 0,01 gramos. Agitando suavemente el picnómetro, se determina y registra la temperatura de calibración del agua con una precisión de 0,1 grados centígrados, introduciendo el termómetro hasta una profundidad de 20 a 80 milímetros del picnómetro. El procedimiento de llenado con agua destilada previamente desairada hasta la determinación de la temperatura de calibración del picnómetro con agua, debe ser reiterado para una temperatura similar o próxima a la de calibración.

##### **— Determinación de la gravedad específica**

En un vaso se deben colocar 100 ml de agua, adicionar la muestra y agitar, colocando en el vaso en la batidora. Con la ayuda de un embudo, colocar la mezcla en el picnómetro. Lavar

todas las partículas retenidas en el embudo con ayuda de agua, agitar el picnómetro hasta formar una mezcla homogénea, lavar cualquier partícula adherida al picnómetro.

Llenar el picnómetro, hasta rebasar la marca de calibración con agua desairada introduciendo está a través de un tubo flexible de diámetro pequeño cuya punta se mantenga ligeramente sumergida. Este proceso debe ser realizado cuidadosamente para evitar que se generen burbujas de aire en la muestra. Para esto el agua puede ser introducida por una manguera de diámetro pequeño. Dejar batir el picnómetro hasta que adquiera la temperatura ambiente.

Dejar que el picnómetro entre en equilibrio térmico durante toda la noche.

Extraer el picnómetro de la conservadora, tomando este por la parte superior del cuello para no alterar la temperatura, ajustar el agua a la marca de calibración con la ayuda del papel absorbente.

Medir y registrar la masa del conjunto picnómetro con una precisión de 0,01g

Medir con el termómetro y registrar la temperatura de la mezcla tomando el dato a una profundidad de 25 a 80 mm así seguidamente verter la muestra en un contenedor y evitar que queden partículas en el picnómetro, luego determinar la masa seca de la muestra.

### **7.1.7. Peso Específico de Agregado Grueso**

#### ***I. NORMA REFERENCIAL***

ASTM C128

#### ***II. EQUIPO***

- a. Balanza
- b. Cucharas
- c. Horno
- d. Tamiz N°4
- e. Canastilla mecánica
- f. Recipiente y bandejas
- g. Tanque de agua
- h. Dispositivo de suspensión

#### ***III. MUESTRA A ENSAYAR***

Obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, se deben eliminar el material inferior a 4,75mm (No 4) mediante el tamizado en seco y lavar para remover los finos adheridos a la superficie.

**Tabla 84.** La masa mínima de la muestra para ensayo son las siguientes.

Tamaño Máximo mm	Nominal pg.	Masa Mínima de la Kg	Muestra de Ensayo lb
12,5	½	2	4,4
19	¾	3	6,6
25	1	4	8,8
37,5	1 ½	5	11
50	2	8	18
63	2 ½	12	26
75	3	18	40
90	3 ½	25	55
100	4	40	88
125	5	75	165

**Fuente:** Cantidades mínimas para ensayo

#### **IV. PROCEDIMIENTO**

Seleccionar el material, el cual se cuartea, se introducirá al horno a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta una masa constante, tamizar la muestra por la malla N°4. todo lo retenido se utilizará en el ensayo.

Lavar la muestra para eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas, posteriormente sumergir en agua durante 24 horas.

Después de ese periodo de inmersión, secar superficialmente la muestra y coloca al interior de la canastilla metálica y determinar el peso sumergido en el agua, a una temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Llevar la muestra al horno a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante, dejar enfriar al aire (ambiente) durante 1 a 3 horas y determinar el peso.

##### **7.1.8. Clasificación del Tipo de Suelos**

###### **a) El sistema de clasificación AASHTO**

Los suelos se clasifican en siete grupos (A-1, A-2, --- A-7), según su granulometría y plasticidad, en función del porcentaje que pasa por los tamices N°200, 40 y 10, y Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz N°40. Estos siete grupos corresponden a dos grandes categorías, suelos granulares (con no más del 35% que pasa por el tamiz N°200) y suelos limo-arcillosos (más del 35% que pasa por el tamiz N°200).

Clasificación general	Material Granular (35% o menos pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35% pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-7			
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5, A-7-6
Análisis por tamiz, % que pasa											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 Máx	35 Máx	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa el N° 40: Límite Líquido Índice Plástico	6 máx.		NP	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 mín.	40 mín. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
Tipo de textura para el procedimiento de diseño del espesor de suelos-cemento	SUELOS DE GRADACIÓN GRANULAR						SUELOS DE GRADACIÓN FINA				

**Figura 76:** Sistema unificado de clasificación de suelos (AASHTO)

**Fuente:** Norma AASHTO

**b) El sistema de clasificación USCS o SUCS**

El Sistema Unificado de Clasificación del suelo (USCS o SUCS) se basa en el sistema de clasificación desarrollado por Casagrande durante la Segunda Guerra Mundial. Con algunas modificaciones fue aprobado conjuntamente por varias agencias de gobierno de los EE.UU. en 1952.

Refinamientos adicionales fueron hechos y actualmente está estandarizado como la norma ASTM D 2487-93

EE.UU. y gran parte del mundo se utilizan en trabajos de geotecnia. Los suelos de un sistema unificado se designan por un símbolo de dos letras:

- El primero considera que el principal componente de la tierra.
- La segunda describe informaciones de la curva granulométrica o características de plasticidad.

Por ejemplo: la arena pobremente graduada se denomina SP y arcilla con baja plasticidad es CL.



**SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)**  
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
<b>SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS</b> Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200	Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/8 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	<b>GW</b> Gravas bien graduadas, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD $C_u$ : mayor de 4 COEFICIENTE DE CURVATURA $C_c$ : entre 1 y 3 $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$		
			<b>GP</b> Gravas mal graduadas, mezcla de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.	
		<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4	CANTIDAD APROXIMADA DE PARTICULAS FINAS	<b>GM</b> Arenas limosas, mezcla de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
				<b>GC</b> Arenas arcillosas, mezcla de grava, arena y arcilla		
		<b>ARENAS LIMPAS</b> Poco o nada de partículas finas	CANTIDAD APROXIMADA DE PARTICULAS FINAS	<b>SW</b> Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poco o nada de finos.	$C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3.	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW
				<b>SP</b> Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poco o nada de finos.		
		<b>ARENAS CON FINOS</b> Cantidad aproximada de partículas finas	CANTIDAD APROXIMADA DE PARTICULAS FINAS	<b>SM</b> Arenas limosas, mezcla de arena y limo.	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.
				<b>SC</b> Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla.		
		<b>SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS</b> Más de la mitad del material pasa por la malla número 200	Las partículas de 0.075 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido menor de 50	<b>ML</b> Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arcillosos o arcillosos ligeramente plásticos.	G = Grava, S = Arena, O = Suelo Orgánico, P = Turba, M = Limo C = Arcilla, W = Bien Graduada, P = Mal Graduada, L = Baja Compresibilidad, H = Alta Compresibilidad
					<b>CL</b> Arcillas inorgánicas de baja o mala plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.	
<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Límite Líquido Mayor de 50	<b>OL</b> Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			<b>MH</b> Limos inorgánicos, limos micáceos o diazómicáceos, más elásticos.		
	<b>CH</b> Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.			<b>OH</b> Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de mala plasticidad.		
<b>SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS</b>	<b>P</b> Turbas y otros suelos altamente orgánicos.					

Figura 77. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)

Fuente: Norma S.U.C.S.

**7.1.9. Relaciones Humedad-Densidad de mezclas compactadas de Suelo-Cemento**

**I. NORMA REFERENCIAL**

ASTM D558 - AASHTO T134

**II. EQUIPO**

- a. Juego de moldes metálicos (molde, collar, placa desmontable)
- b. Martillo metálico
- c. Extractor de muestra
- d. Balanzas y bascula
- e. Horno
- f. Regla metálica
- g. Tamices (3", 3/4" No 4)
- h. Cápsulas o recipientes
- i. Equipo de manipuleo

**III. MUESTRA A ENSAYAR**

La cantidad mínima de muestra para dicho ensayo sea métodos A o B es de unos 16kg.

Existe diferentes métodos. Elegir el método que permita un mayor porcentaje retenido los cuales dependen de la granulometría

**Tabla 85.** Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación

Método A	Método B
Muestras que pasan al 100% el tamiz de 4,75mm (No. 4).	Muestras que pasan el tamiz de 19,00mm (3/4"), cuando el suelo quede retenido en el tamiz de 4,75mm (No 4), pero no más de 30% quede retenido en el tamiz de 19,00mm (3/4")

Fuente: INVE-611-13

**Tabla 86.** Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación

Método	A	B	C
<b>Diámetro de molde</b>	101,6 mm	101,6 mm	152,4mm
<b>Material</b>	Pasa tamiz de 4,75mm	Pasa tamiz de 9,5mm	Pasa tamiz de 19,0mm
<b>Capas</b>	5	5	5
<b>Golpes</b>	25	25	56

Fuente: INVE-142-13

**Tabla 87.** Contenido de cemento aproximado según la granulometría

Grupo de suelo según la AASHTO	% de cemento requerido en peso	Contenido de cemento estimado para la prueba de compactación en peso	Contenido de cemento para la prueba de humedecimiento y secado en peso
A-1-a	3 a 5	5	3 - 4 - 5 - 7
A-1-b	5 a 8	6	4 - 6 - 8
A2	5 a 9	7	5 - 7 - 9
A3	7 a 11	9	7 - 9 - 11
A4	7 a 12	10	8 - 10 - 12

<b>A5</b>	8 a 13	10	8 – 10 – 12
<b>A6</b>	9 a 15	12	10 – 12 -14

**Fuente:** Portland Cement Association

— **Método A**

Disgregar todos los terrones de suelo existente en la muestra, los cuales deberán pasar el 100% del tamiz No 4, el secado de dicho material puede ser al aire o meter al horno a una temperatura que no exceda los 60°C

— **Método B**

La muestra para el ensayo se prepara separando el agregado retenido en el tamiz de 4,75mm y disgregando los terrones de suelo. Se determina el porcentaje de material.

El material seleccionado es el retenido en los tamices de 19,00mm y de 4,75mm.

El material ya seleccionado se satura con agua durante 24 horas, luego seca superficialmente para el ensayo posterior.

Se escogen y se mantienen separadamente las muestras representativas del suelo que pasa el tamiz de 4,75mm y del agregado saturado. De manera que la muestra total tenga una masa aproximada de 5kg.

El porcentaje en masa al horno del agregado que pasa tamiz de 19,00mm y retenido en el de 4,75mm, deberá ser igual al porcentaje que pasa el tamiz de 75mm y quede retenido en el de 4,75mm de la muestra original.

**IV. PROCEDIMIENTO**

— **Método A**

Se agrega al suelo la cantidad requerida de cemento. Se mezcla completamente hasta lograr un color uniforme.

Se agrega suficiente agua para humedecer la mezcla aproximadamente de cuatro a seis puntos por debajo de la humedad óptima (mezclar de manera homogénea).

La mezcla se cubre y se deja reposar por un periodo de 5 a 10 minutos para que haya dispersión de la humedad y permita una absorción más completa.

Compactar en los moldes, con el collar ajustado, la mezcla preparada de suelo-cemento introducir al molde en tres capas iguales, de manera que el espesor total compactado sea alrededor de 130mm, cada capa se compacta mediante 25 golpes de martillo, uniformemente distribuidos con una caída libre de 305mm por encima de la elevación.

Después de la compactación, se remueve el collar de extensión, se enrasa cuidadosamente la parte superior de la probeta con ayuda de un cuchillo o la regla metálica y se determina la masa del molde con la muestra de suelos-cemento compactada, con cuatro cifras significativas.

Se extrae del molde una pequeña cantidad de muestra representativa no menor a 100g inmediatamente se determina el peso de la misma y se anota la masa del material húmedo. Secando al horno a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  por mínimo de 12 horas o hasta masa constante, pudiendo determinar la humedad de ese punto.

El mismo material del molde se disgrega completamente, adicionar agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad de la mezcla de suelo-cemento en uno o dos puntos porcentuales, repetir el mismo procedimiento ya mencionados pero cada vez incrementando agua.

Este proceso ha resultado satisfactorio, sin embargo, en algunos casos cuando la muestra es frágil y el tamaño de las partículas reduce significativamente debido a la compactación repetida, se deberá emplear el remplazo de la muestra para cada determinación de humedad y densidad.

Para minimizar el efecto de la hidratación del cemento se debe realizar de manera continúa hasta su finalización del mismo.

#### — **Método B**

Se disgrega la porción de la muestra de suelo que pasa el tamiz de 4,75mm, la cantidad requerida de cemento para la mezcla total especificada llegando a un color uniforme.

Agregar el agua requerida después de esta preparación, finalmente se adiciona el agregado saturado con la superficie seca a la mezcla de suelo-cemento que pasa el tamiz de 4,75mm y mezclar completamente, formando un espécimen.

De la misma manera que el método A se los compacta para luego enrasarlo y se determina la masa del espécimen compactado, se remueve el material del molde y se toma una muestra significativa no menores a 500g para determinar la humedad.

#### **7.1.10. Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento)**

##### ***I. NORMA REFERENCIAL***

ASTM D559 - AASHTO T135

##### ***II. FUNDAMENTO TEÓRICO***

Existen algunos suelos los cuales, sometidos a temperaturas muy bajas, a congelamiento y descongelamiento repetitivos, pierden gran parte de su resistencia. Arcillas y limos, por lo general,

sufren este tipo de daño. Durante la etapa de congelamiento es posible que pueden alcanzar deformaciones alarmantes en la superficie de carreteras. Tres elementos son necesarios para que este tipo se desarrolle, suelos susceptibles, bajas temperaturas, fuentes de agua subterránea.

Se refiere estos métodos de ensayo a determinar las pérdidas del suelo-cemento, los cambios de humedad y de volumen (expansión y contracción) producidos por el humedecimiento y secado repetido de especímenes endurecidas de suelo-cemento.

Se señalan dos métodos según la granulometría del suelo, para la preparación del material para moldear los especímenes.

**Tabla 88.** Valores promedio de agua retenida

Clasificación AASHTO del suelo que se está Estabilizando	Promedio de agua retenida después de secado a 110°C, %
A-1, A-3	1,5
A-2	2,5
A-4, A-5	3,0
A-6, A-7	3,5

**Fuente:** Clasificación AASHTO

Para la preparación del material, se contemplan dos métodos según la granulometría del suelo, aplicando los mismos criterios de los métodos A y B de la norma INV E-611.

### **III. EQUIPO**

Para este ensayo descrito en esta norma se emplea el mismo equipo requerido para preparación y compactación las mezclas de suelo-cemento, según se describe en la norma INV E-611. Adicionalmente, se necesitan los siguientes elementos.

- a. Horno capaz de mantener la temperatura de  $71 \pm 2$  °C
- b. Cámara húmeda o recipientes cubierto que mantenga una temperatura de  $21 \pm 1,7$ °C
- c. Cámara de inmersión para sumergir las probetas de ensayo en agua a temperatura ambiente.
- d. Cepillo de pelo de alambre liso de 50mm de longitud por 1,6mm de ancho y 0,5mm de espesor
- e. Balanza que permita pesar nominalmente 5kg

### **IV. MUESTRA A ENSAYAR**

La muestra de suelo se debe preparar de acuerdo con el anterior ensayo Proctor modificado ya realizado anteriormente.

---

### — Método A

Se agrega al suelo la cantidad requerida de cemento, se mezclan hasta que se obtenga un color uniforme. Se agrega la cantidad óptima de agua que se determinó anteriormente con el ensayo relación humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento.

Una vez mezclada homogéneamente, el espécimen se cubre y se deja en reposo entre 5 y 10 minutos para que haya dispersión de la humedad y permitir una absorción más completa por parte del suelo-cemento

Después del periodo de absorción, se disgrega la mezcla completamente sin reducir el tamaño natural de las partículas

Se forma un espécimen compactando inmediatamente la mezcla de suelo-cemento en el molde con el collar ajustado y enrasando la superficie del espécimen de acuerdo con el método A según la norma INV E-611, se escarifica la parte superior de la primera y de la segunda capa para romper planos lisos de compactación antes de colocar y compactar las capas subsiguientes.

Se tomarán muestras con una masa mínima de 100 g anotando el peso y poder llevar al horno hasta un peso constante para determinar el contenido de humedad

Se determina y anota la masa del espécimen compactado, seguido se extrae el espécimen del molde

Se forma un segundo espécimen tan rápidamente sea posible realizando el mismo procedimiento del primer espécimen compactado

Se determina el diámetro y la altura promedio del espécimen No1 y se calcula el volumen, posteriormente el espécimen se coloca en un dispositivo adecuado en la cámara húmeda y se protegen del agua libre durante 7 días finalizado ese tiempo se deberá determinar nuevamente la masa y dimensiones.

### — Método B

Se forma un espécimen, compactar inmediatamente la mezcla de suelo-cemento y enrasar la superficie del espécimen de acuerdo con el método B del ensayo INV E-611.

Durante la compactación, se toma una muestra representativa de la mezcla de suelo-cemento, que tenga una mínima de 100g. se determina y anota esta masa así llevando al horno durante 12 horas o a una masa constante.

El contenido de agua se calcula y se compara con la humedad óptima de diseño

Finalizada la compactación se extrae el espécimen del molde.

Inmediatamente, se forma un segundo espécimen, de los cuales se determinará el diámetro y la altura promedio del espécimen.

Se colocan los especímenes en dispositivos adecuados en la cámara húmeda y se protege del agua libre durante un periodo de 7 días

**V. PROCEDIMIENTO**

**— Método A**

Después de los 7 días de curado en la cámara húmeda, las probetas de ensayo deben ser colocadas en la cámara de inmersión, donde permanecen durante 5 horas, para la primera probeta se determinará la masa y las dimensiones de la misma. A continuación, se los lleva al horno a una temperatura de  $71\pm 3^{\circ}\text{C}$ , donde permanecerán 42 horas, pasada las 42 horas, la segunda probeta de del ensayo deben ser cepilladas, 20 cepilladas verticales en la superficie lateral y 4 en las bases, el procedimiento de enfriamiento y cepillado deben durar máximo 1 hora

Este procedimiento descrito anteriormente constituye a un ciclo (48 horas) de inmersión y secado al horno. Esta operación se repite durante 12 ciclos, incluyendo el primero

Terminando los 12 ciclos colocar las probetas en el horno a una temperatura de  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante y determinar sus pesos secos

Donde la primera probeta se podrá determinar el cambio de volumen existente y la segunda probeta se determinará la perdida de suelo-cemento.

**— Método B**

Se realiza de la misma manera que el método A

**7.1.11. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento**

**I. NORMA REFERENCIAL**

ASTM D1632 – ASTM D1633

**II. EQUIPO**

- a. Máquina para el ensayo de compresión
- b. Moldes y equipo de comparación

**III. MUESTRA A ENSAYAR**

Los especímenes de ensayo se moldean de la siguiente manera

**Tabla 89.** En el cual se proporcionarán dos procedimientos alternativos

<b>Método A</b>	<b>Método B</b>
Cilindros de 101,6mm de diámetro y 116,4mm de altura.	Cilindros de 71,1mm de diámetro y 142,2mm de altura.

<b>H/D=1,15</b>	<b>H/D=2</b>
Materiales con 30% o menos retenido en el tamiz de 19mm	Materiales que pasan en su totalidad el tamiz de 4,75mm

**Fuente:** Elaboración propia

— **Método A**

Los especímenes de 101,6mm y de 116,4mm de altura se moldean de acuerdo con la norma INV E-612.

Al final del periodo de curado húmedo, los especímenes se sumergen en agua por 4 horas.

Se remueven los especímenes del agua y se efectúan los ensayos de compresión tan pronto como sea posible. Los especímenes se deberán mantener húmedos hasta el instante del ensayo.

Se comprueba la lisura de las caras del espécimen con una regla.

— **Método B**

Los especímenes de 71,1mm y de 142,2mm de altura se moldean de acuerdo con la norma INV E-613.

Al final del periodo de curado húmedo los especímenes se sumergen en agua por 4 horas.

Se remueven los especímenes del agua y se efectúan los ensayos de compresión tan pronto como sea posible. Los especímenes se deberán mantener húmedos hasta el instante del ensayo.

Se comprueba la lisura de las caras del espécimen con una regla.

**IV. PROCEDIMIENTO**

— **Método A**

Se coloca el bloque inferior de apoyo sobre la plataforma de la máquina de ensayo, directamente debajo del doble de apoyo superior con asiento esférico. Se coloca el espécimen sobre el bloque inferior, asegurándose de que el eje vertical del espécimen este alineado con el centro de empuje del bloque superior. A medida que el cabezal esférico se conduce para apoyarlo sobre la placa superior, se rota suavemente su parte móvil con la mano, con el fin de obtener un asentamiento uniforme.

Se aplica la carga continuamente y sin impactos. Se puede usar una máquina de ensayo operada por tornillo, que opere a una velocidad aproximada de 1mm por minuto cuando trabaje en vacío. Con máquina hidráulicas, las cargas se debe ajustar a una velocidad constante dentro de los límites de  $140 \pm 70$  KPa/s ( $20 \pm 10$  lbf/pg<sup>2</sup>/s), dependiendo de la resistencia del espécimen. Se registra la carga total a la falla del espécimen de ensayo, con una precisión de 40N (10lbf)



— **Método B**

Se realiza de la misma manera que el método A.

**7.1.12. Relación Soporte California (CBR)**

**I. NORMA REFERENCIAL**

AASHTO T193-03.

ASTM D1883-07.

**II. EQUIPO**

- a. Molde de CBR (juego de moldes metálicos incluyendo pesos de sobrecarga)
- b. Disco espaciador
- c. Martillo metálico de 4,5 kg
- d. Regla o Enrasador
- e. Extensómetro
- f. Horno de secado capaz de mantener una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- g. Placa perforada con vástago
- h. Base del molde
- i. Collar
- j. Papel filtro
- k. Balanza de 0,01g de precisión
- l. Tanque para inmersión de probetas
- m. Equipo de manipuleo

**III. MUESTRA A ENSAYAR**

Si todo el material pasa el tamiz de 19mm (3/4"), se deberá usar la gradación entera, sin modificación para preparar las muestras para fabricar los especímenes para ensayo. Si hay partículas retenidas en dicho tamiz, ella se deberá remover y reemplazar por una cantidad igual, en masa, de material que pase el tamiz de 19mm (3/4") y quede retenido en el tamiz de 4,75mm (No. 4).

La muestra representativa deberá ser mayor o igual a 20 kg para los tres moldes.

**Tabla 90.** Capacidad mínima de carga

MÉTODO	GOLPES	CAPAS	PESO DEL MARTILLO
Met. A-Suelos de grano fino	56	3	24,5
Suelo grueso	56	3	24,5

Met. B-Suelos de grano fino	46	5	44,5
Suelo grueso	46	5	44,5

Fuente: Norma AASHTO

**Tabla 91.** Valores referenciales de CBR para diferentes suelos

No CBR	Clasificación General	Usos	Unificado	AASHTO
0 - 3	Muy pobre	Sub rasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3 - 7	Muy pobre a regular	Sub rasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7 - 20	Regular	Sub base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Sub base y base	GM, GS, SW, SM, SP, GP	A-1b, A2-5, A-3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A-1a, A2-4, A-3

Fuente: Norma AASHTO

#### **IV. PROCEDIMIENTO**

Se selecciona la muestra a ensayar, aplicando los criterios dados en la norma, mediante el ensayo Proctor de referencia se determina la humedad óptima para fabricar las probetas de CBR

- Molde
- Collar
- Disco espaciador
- Papel filtro

La muestra se mezcla homogéneamente con la cantidad de agua calculada. El primer molde en cinco capas y se compacta cada una con 12 golpes, segundo molde en cinco capas y se compactan cada una de 25 golpes y el tercer molde en cinco capas y se compactan cada una de 56 golpes

Una vez obtenidas las probetas antes de sumergir al agua se toman dos muestras para determinar la humedad de compactación, se toma una muestra antes y otra después de compactar donde se calcula la humedad promedio.

Posteriormente a la compactación se engrasan y se pesa, así invirtiendo el molde y se fija la base para determinar la masa del conjunto

Finalmente, se coloca el vástago para acomodar el aparato de expansión en los tres moldes, las primeras mediciones, pudiendo controlar la expansión

#### ***Inmersión de las probetas***

Las probetas compactadas se invierten y se les coloca una placa perforada con vástago, el cual servirá de referencia para medir el hinchamiento del suelo, se coloca con sobrecargas, con una presión equivalente a la que soportará el suelo.

Se sumerge la probeta, las superficies inferior y superior deben estar en contacto con el agua, se toma la primera lectura para calcular el hinchamiento de la probeta durante el tiempo de inmersión, se mantiene sumergida durante 96 horas, para finalmente medir el hinchamiento


Se escurre durante 15min. seguido se retira la sobrecarga y la placa perforada.

Se coloca la probeta en el equipo de penetración con las sobrecargas, se aplica una carga de 50N para asentar el pistón, penetra a una velocidad uniforme de 1,2mm por minuto.

Registrar los valores de carga para las magnitudes de penetración.

## 7.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE SUELO RECICLADO

### ANEXO 1. Análisis Granulométrico de Suelo por Tamizado

	<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO</b>	
	NORMAS TECNICAS:	AASHTO T27-93 ASTM D422-63
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia	Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 30-11-2023 Planilla No: 1	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>		
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>		

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HÚMEDAD	Humedad Natural	Humedad Higroscópica	PESO DE LA MUESTRA TOTAL SECA	
Tara No.	H-1	H-1	Peso total de la muestra húmeda [g]	7910,40
			Tara + muestra húmeda [g]	8420,40
Tara + muestra húmeda [g]	258,00	38v9,00	Peso de la muestra seca [g]	510,00
Tara + muestra seca [g]	256,00	385,00	Peso muestra retenida tamiz No. 10	4235,00
Peso del agua [g]	2,00	4,00	Peso muestra que pasa tamiz No. 10	3675,40
Peso de la tara [g]	90,1	58	Peso del agua [g]	44,42
Peso de la muestra seca [g]	165,90	327,00	Peso muestra seca pasa tamiz No. 10	3630,98
Contenido de humedad [%]	1,21	1,22	Peso de la muestra total seca [g]	7865,98

ANÁLISIS DEL AGREGADO GRUESO					
Tamiz	Abertura mm	Peso Retenido [g]	%Parcial Retenido %Rp	Acumulado	
				%Retenido %Rt	% que pasa %Pt
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	1050,00	13,35	13,35	86,65
3/4"	19,10	983,00	12,50	25,85	74,15
1/2"	9,52	1049,00	13,34	39,18	60,82
3/8"	9,52	429,00	5,45	44,64	55,36
No. 4"	4,76	724,00	9,20	53,84	46,16
Total		4235,00			

ANÁLISIS MECÁNICO DEL MORTERO	
Peso muestra húmeda [g]	769
Peso muestra seca [g]	759,71

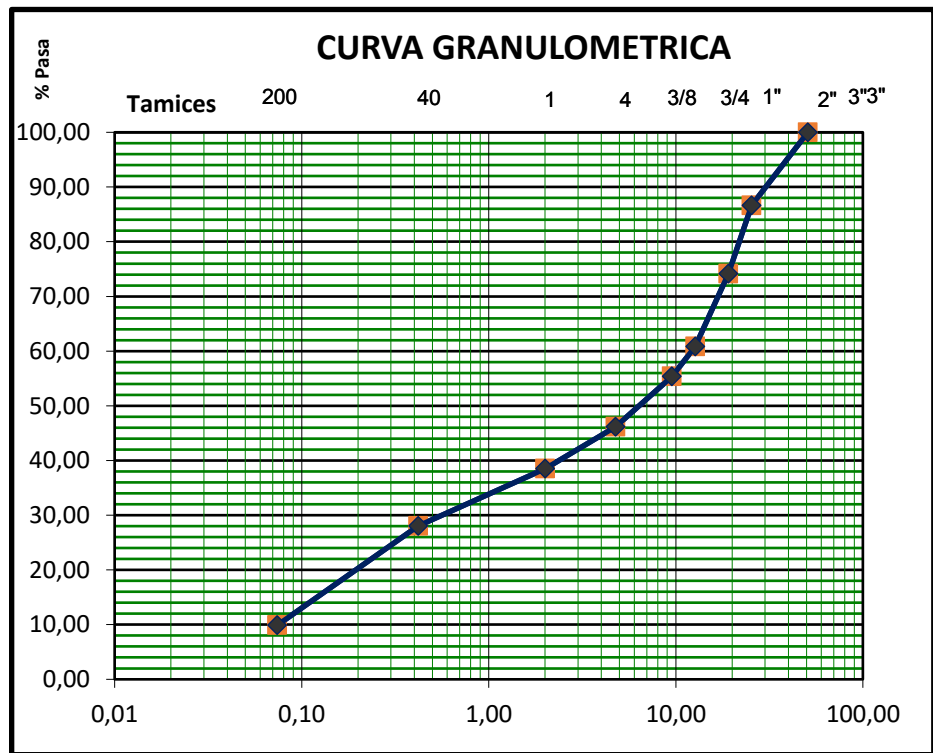
ANÁLISIS DEL AGREGADO FINO						
Tamiz	Abertura mm	Peso Retenido [g]	% Parcial Retenido %Rp	Acumulado		% que pasa Total
				% Retenido %Rt	% que pasa %Pt	
No. 4"	4,76	0			100	46,16
No. 10	2,00	126,00	16,59	16,59	83,41	38,50
No. 40	0,42	172,00	22,64	39,23	60,77	28,05
No. 200	0,07	299,00	39,36	78,58	21,42	9,89
Total		597,00				

**Distribución Granulométrica**


Designación	Diámetro partículas mm	Porcentaje que pasa
2"	50,80	100,00
1"	25,40	86,651
3/4"	19,10	74,155
1/2"	12,70	60,819
3/8"	9,52	55,365
N°4	4,76	46,161
N°10	2,00	38,505
N° 40	0,42	28,054
N° 200	0,07	9,886

**Porcentaje de Partículas**

GRAVA [%]	<b>53,84</b>
ARENA [%]	<b>36,27</b>
FINO [%]	<b>9,89</b>
TOTAL [%]	<b>100,00</b>



ANEXO 2. Límites de Contracción

 		<b>LÍMITES DE CONTRACCIÓN (Método de Parafina)</b> NORMAS TECNICAS: ASTM D4943-18	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 06-12-2023 Planilla No: 2	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

MUESTRA N°	S-C
Volumen del recipiente:	47,30
Peso recipiente más pastilla de suelo húmedo: Wh (gr)	110,30
Peso recipiente más pastilla de suelo seco: Ws (gr)	94,10
Peso del recipiente: Wc (gr)	26,10
Agua contenida: Pa = (Wh - Ws) (gr)	16,20
Suelo seco: Ps = Ws - Wc (gr)	68,00
Contenido de humedad inicial: %hi = (Pa/Ps) x 100	23,82


PARAFINA	
Peso en el aire pastilla de suelo seco con parafina:	80,7
Peso pastilla de suelo seco con parafina sumergido:	26,1
Peso del lastre:	0,1
Densidad de la parafina:	0,87
Densidad del Agua:	1
Volumen de pastilla seco en parafina	54,7
Peso de la parafina	12,70

VOLUMEN DE PARAFINA	14,60
VOLUMEN DEL SUELO SECO	40,10

DETERMINACIÓN DE VOLUMENES	
Volumen de la pastilla de suelo húmedo: Vh (cm <sup>3</sup> )	47,30
Volumen de la pastilla de suelo seco: Vs (cm <sup>3</sup> )	40,10
Volumen contraído (Vh - Vs) (cm <sup>3</sup> )	7,20
Relación (Vh - Vs) / Ps	0,11



CÁLCULO DE FACTORES	
Límite de contracción LC	13,24%
Relación de Contracción RC	1,70
Contracción Volumétrica CV	17,95
Contracción Lineal CL	6,38

ANEXO 3. Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de perdida por ignición

		<p align="center"><b>DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DE UN SUELO MEDIANTE EL ENSAYO DE PERDIDA POR IGNICIÓN</b></p> <p align="right">NORMAS TECNICAS: INV E-121-13 AASHTO T194</p>
<p align="center"><b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia</p>	<p>Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 08-12-2023 Planilla No: 3</p>	
<p align="center"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p>		
<p align="center"><b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b></p>		

Contenido de material orgánica		
	A	B
Peso del plato + suelo de evaporación antes de la ignición:	3234,90	5057,70
Peso del plato + suelo de evaporación después de la ignición:	3208,80	5037,70
Peso del plato:	353,00	3029,10
<b>% Material Orgánica:</b>	0,91	0,99

ANEXO 4. Equivalente de arena

 		<b>EQUIVALENTE DE ARENA</b>	
		<b>NORMAS TECNICAS:</b>	<b>AASHTO T176-79</b> <b>ASTM D2419-74</b>
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha:</b> 11-12-2023 <b>Planilla No:</b> 4	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

MUESTRA	1	2	3	PROMEDIOS
Lectura en suspensión - L.A.=	11	10,4	7,4	
Lectura en sedimentación TOTAL- L.B.=	13,1	12,9	12	
Lectura en sedimentación =	3,1	2,9	2	
Equivalente arena E.A.=	29	28	28	28,00
% de Finos =	71	72	72	72,00

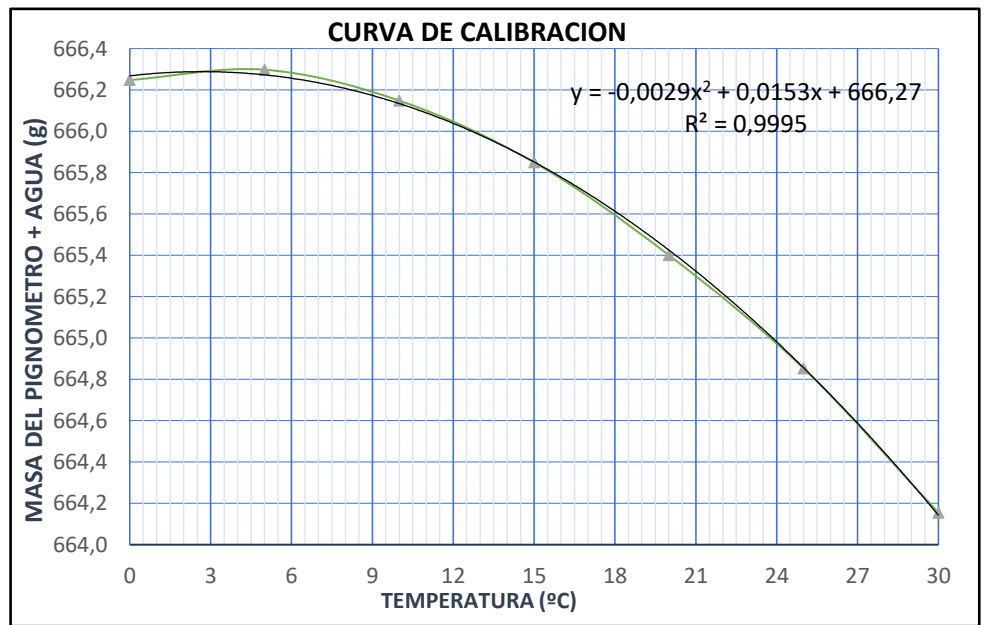


ANEXO 5. Gravedad específica de las partículas solidas

		<b>GRAVEDAD ESPECIFICA DE LAS PARTÍCULAS SOLIDAS</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: AASHTO T100-70 ASTM D854-02	
		Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 12-12-2023 Planilla No: 5	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

Temp. (Cº)	y wti	Mpw,tt
0	0,9999	666,248
5	1,0000	666,298
10	0,9997	666,148
15	0,9991	665,849
20	0,9982	665,401
25	0,9971	664,852
30	0,9957	664,155



CALIBRACION DEL PIGNOMETRO		
Nº	1	2
Mp(gr)=	167,9	164,8



Para el agua:	
Temp. T [°C]	Gr [gr/cm³]
10	0,9997
11	0,9996
12	0,9995
13	0,9994
14	0,9993
15	0,9991
16	0,9990
17	0,9988
18	0,9986
19	0,9984
20	0,9982
21	0,9980
22	0,9978

Picnómetro No.	1	2
Peso Picnómetro + Agua + Suelo W1 [g]	733,6	731,1
Temperatura T [°C]	18	18
Peso específico del Agua T = 20°C G T=20	0,9982	0,9982
Peso Picnómetro + Agua W2 [g]	665,6	663,1
Recipiente de evaporación No.	H-1	H-2
Peso del recipiente + Suelo Seco Wrs [g]	200,1	222,5
Peso del recipiente Wr [g]	91,5	113
Peso del suelo seco Ws [g]	108,6	109,5
Peso específico del agua a temperatura de ensayo G T=18	0,9986	0,9986
Relación entre densidades del agua K	1,0004	1,0004
Peso del picnómetro WB [g]	167,9	164,8
Peso Específico del Suelo Gs	2,676	2,64
<b>Peso Específico del Suelo (PROMEDIO) Gs</b>	<b>2,6578</b>	

ANEXO 6. Peso específico de agregado grueso

 		<b>PESO ESPECIFICO DE AGREGADO GRUESO</b>	
		<b>NORMAS TECNICAS:</b>	<b>ASTM C128</b>
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha:</b> 14-12-2023 <b>Planilla No:</b> 6	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

<b>PESO ESPECIFICO DEL AGREGADO GRUESO ASTM C-127</b> <b>GRAVA 16-20 mm</b>	
MUESTRA Nro.	1
Peso recipiente seco =	148,5
Peso muestra saturada superficialmente seca B=	4224,700
Peso muestra + canastilla (sumergidos) C1=	3419,200
Peso canastillo sumergido C2=	816,900
Peso muestra sumergida C=C1-C2=	2602,300
Peso igual volumen de agua D=B-C=	1622,400
PESO ESPECÍFICO G <sub>sss</sub> =B/D=	2,604
<b>Peso Específico seco G<sub>s</sub>=A/D=</b>	<b>2,482</b>

<b>ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO ASTM C-127</b>	
Peso muestra secada al Horno + recipiente	4174,500
Peso muestra secada al Horno A=	4026,000
Peso agua Absorbida E=B-A=	198,700
Absorción en porcentaje (E/A) * 100=	4,935
<b>ABSORCION PROMEDIO en %</b>	<b>4,935</b>

ANEXO 7. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento

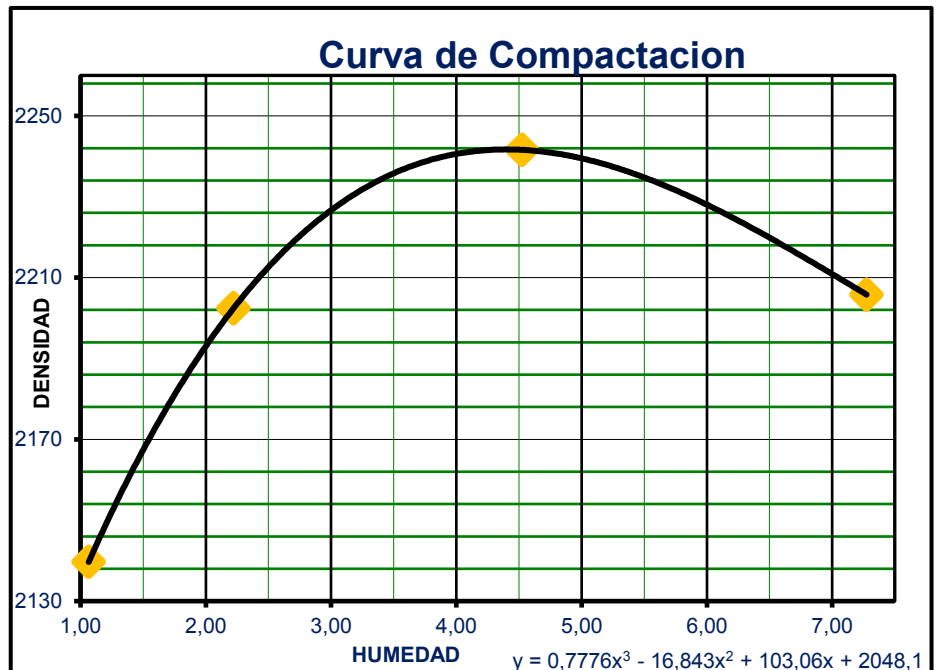
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 18-12-2023 Planilla No: 7	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11005	11192	11385	11434
Peso Suelo Húmedo	gr	4552	4739	4932	4981
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2162	2251	2343	2366
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	338,30	522,10	598,60	593,20
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	335,70	512,00	575,20	557,00
Peso Agua	gr	2,60	10,10	23,40	36,20
Peso Cápsula	gr	91,60	57,20	57,90	59,40
Peso Suelo Seco	gr	244,10	454,80	517,30	497,60
Contenido de Humedad	%	1,1	2,2	4,5	7,3
Peso Específico Seco	Kg/m3	2140	2202	2242	2206

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453


Densidad Máxima	2242	Kg/m3
Humedad Optima	4,4	%



PROYECTO DE GRADO

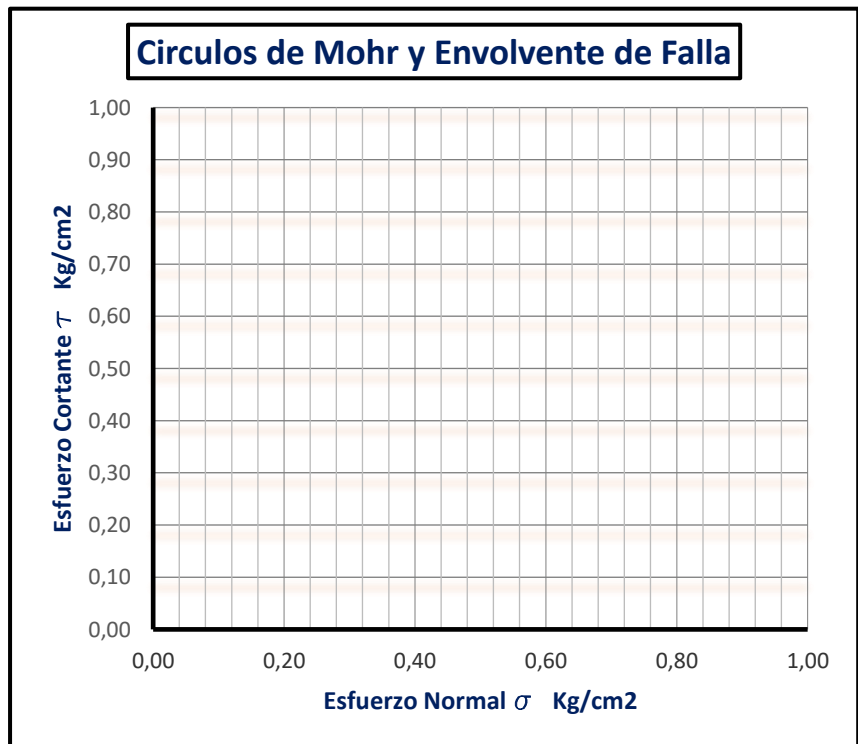
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

ANEXO 8. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento

		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-614-13	
		Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 19-12-2023 Fecha de Rotura: 26-12-2023 Planilla No: 8	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

No-Probeta	% Cemento	Densidad Máxima Kg/m <sup>3</sup>	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm <sup>2</sup>	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso Rotura	Densidad Rotura	Fecha de Moldeo	Fecha de Rotura
1				10	11,57	78,54	908,71	1927	2,12		
2	0%	2242	4,4	10	11,57	78,54	908,71	1900	2,09	15/12/2023	22/12/2023
3				10	11,57	78,54	908,71	1926	2,12		
Promedio									2,11		

Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm <sup>2</sup>	Tensión Rotura Mpa
7	0	0,00	0,00
	0	0,00	0,00
	0	0,00	0,00
Promedio =		0,00	0,00



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

ANEXO 9. Relación califonia (CBR)

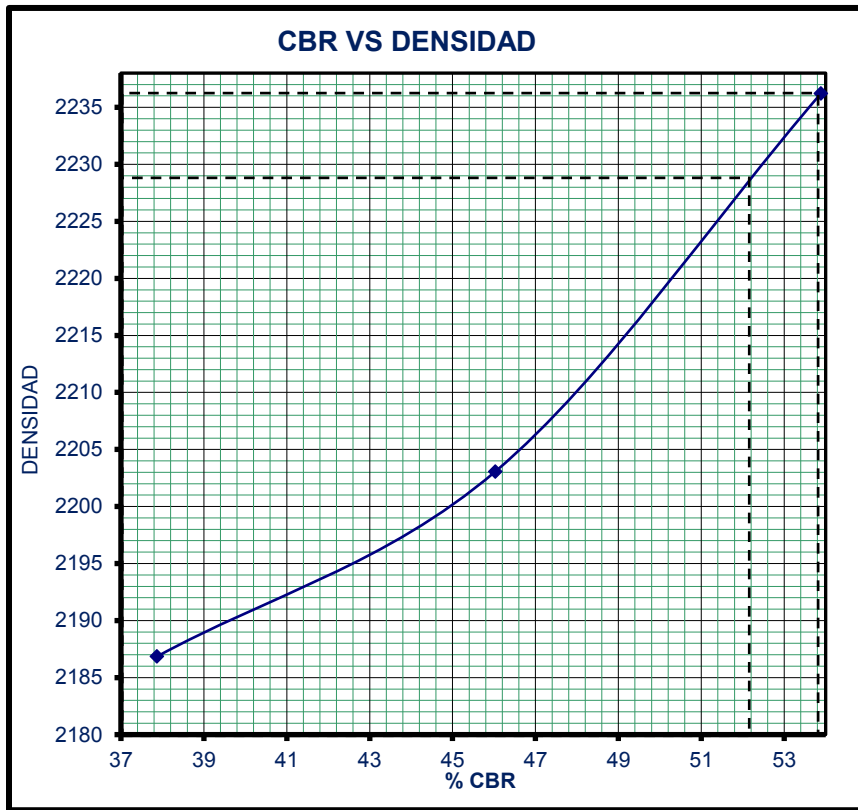
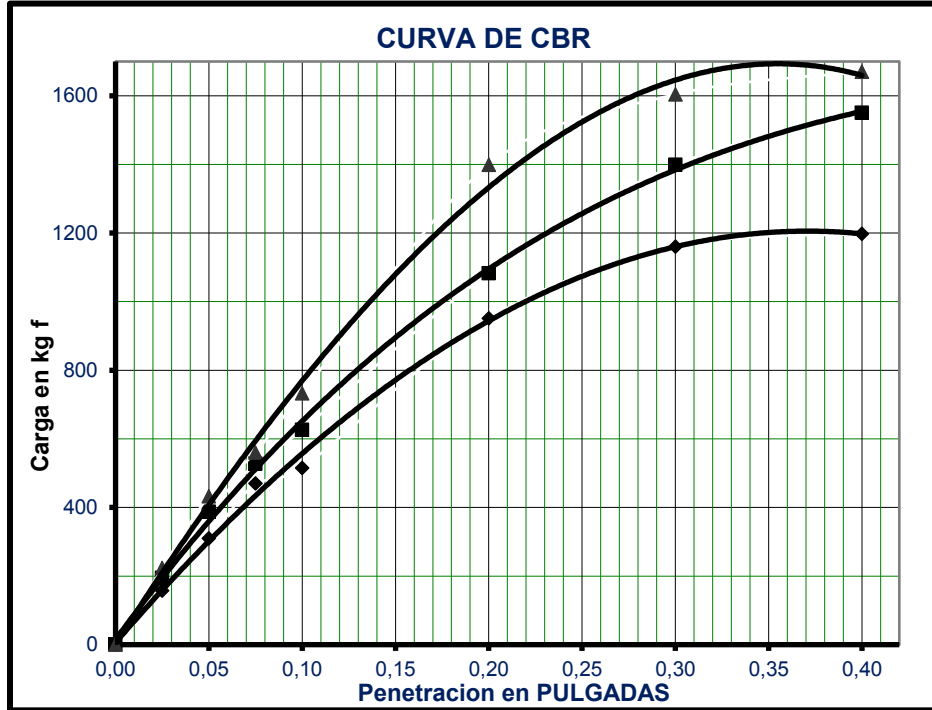
 		<b>RELACIÓN CALIFORNIA (CBR)</b>	
		NORMAS TECNICAS:	AASHTO T193-03 ASTM D1883-07
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 22-12-2023 Planilla No: 9	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

<b>ENSAYO DE COMPACTACION</b>		<b>Clasificación</b>	<b>AASHTO - SUCS</b>
Densidad Máxima	2242 Kg/m3		A-1-a (0) GP - GM
Humedad Optima	4,4 %		

COMPACTACION DE LA MUESTRA						
	Embebido		Antes		Des.	
Nº de Molde	4		5		6	
Nº de golpes por capa	5/12		5/25		5/56	
Peso Hum. Muestra + molde	12998	12998	13062	13062	13115	13115
Peso del molde	8099		8088		8077	
Peso Húmedo de la Muestra	4899	4899	4974	4974	5038	5038
Volumen de la Probeta	2149		2160		2157	
Densidad Húmeda de Muestra	2280	2280	2303	2303	2336	2336

HUMEDADES DE COMPACTACION						
Nº de Tara	A	B	C	D	E	F
Peso Suelo Húmedo + Tara	306,00	426,00	305,70	437,10	307,00	509,10
Peso Suelo Seco + Tara	296,00	404,20	295,00	415,30	296,50	483,50
Peso del Agua	10,00	21,80	10,70	21,80	10,50	25,60
Peso de la Tara	60,30	60,30	58,50	57,90	60,30	60,30
Peso del Suelo Seco	235,70	343,90	236,50	357,40	236,20	423,20
% de Humedad	4,24	6,34	4,52	6,10	4,45	6,05

PENETRACION			Lectura	Kg F	CBR%	Lectura	Kg F	CBR%	Lectura	Kg F	CBR%
Tiem.	Pulg.	Cm.									
			<b>12</b>			<b>25</b>			<b>56</b>		
0,5	0,025	0,63	38	157,5		47	195		54	223	
1,0	0,050	1,27	75	310		94	388		105	433	
1,5	0,075	1,90	114	470		128	527		136	560	
2,0	0,1	2,54	125	515	37,9	152	626	46,0	178	733	53,9
4,0	0,2	5,08	231	951	46,6	263	1082	53,0	340	1399	68,6
6,0	0,300	7,62	282	1160		340	1399		390	1604	
8,0	0,400	10,16	291	1197		377	1551		406	1670	



<b>CBR 100% T 180 D (0,1")</b>	<b>CBR 95% T 180 D (0,1")</b>
<b>54</b>	<b>52</b>

### 7.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO

ANEXO 10. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento

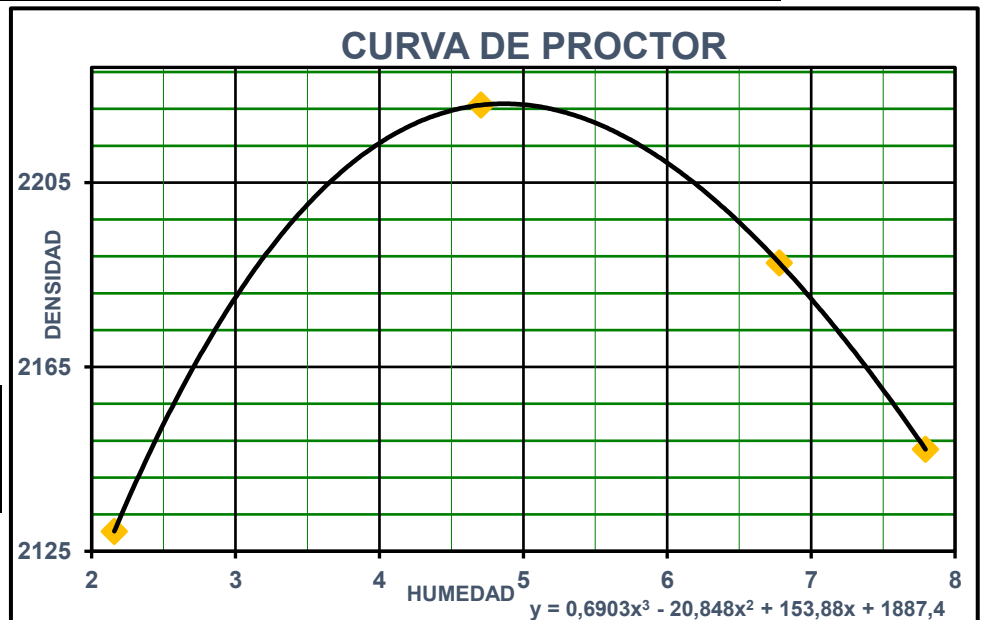
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-611-13 Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 27-12-2023 Planilla No: 10	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

**SUELO RECICLADO + 1%CEMENTO PORTLAND (SR + 1%CP)**

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11032	11350	11370	11325
Peso Suelo Húmedo	gr	4579	4897	4917	4872
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2175	2326	2336	2314
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	546,00	656,00	697,00	616,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	536,40	631,60	659,50	579,70
Peso Agua	gr	9,60	24,40	37,50	36,30
Peso Cápsula	gr	91,50	113,00	106,30	114,00
Peso Suelo Seco	gr	444,90	518,60	553,20	465,70
Contenido de Humedad	%	2,2	4,7	6,8	7,8
Peso Específico Seco	Kg/m3	2129	2222	2188	2147

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2222	Kg/m3
Humedad Optima	4,9	%



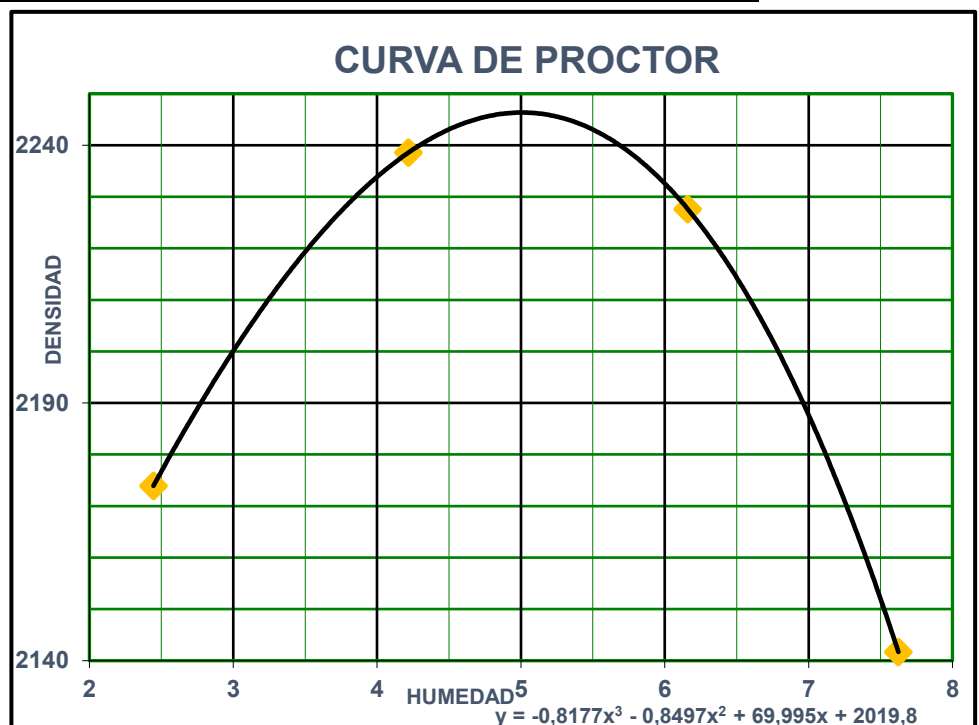
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-611-13	
		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 27-12-2023 Planilla No: 11	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO PORTLAND (SR + 2%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11141	11364	11431	11305
Peso Suelo Húmedo	gr	4688	4911	4978	4852
Peso Especifico Húmedo	Kg/m3	2227	2333	2365	2305
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	478,00	481,00	353,00	544,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	468,00	464,00	336,00	513,00
Peso Agua	gr	10,00	17,00	17,00	31,00
Peso Cápsula	gr	59,00	61,00	60,00	106,40
Peso Suelo Seco	gr	409,00	403,00	276,00	406,60
Contenido de Humedad	%	2,4	4,2	6,2	7,6
Peso Especifico Seco	Kg/m3	2174	2239	2228	2142

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2246	Kg/m3
Humedad Optima	5,0	%





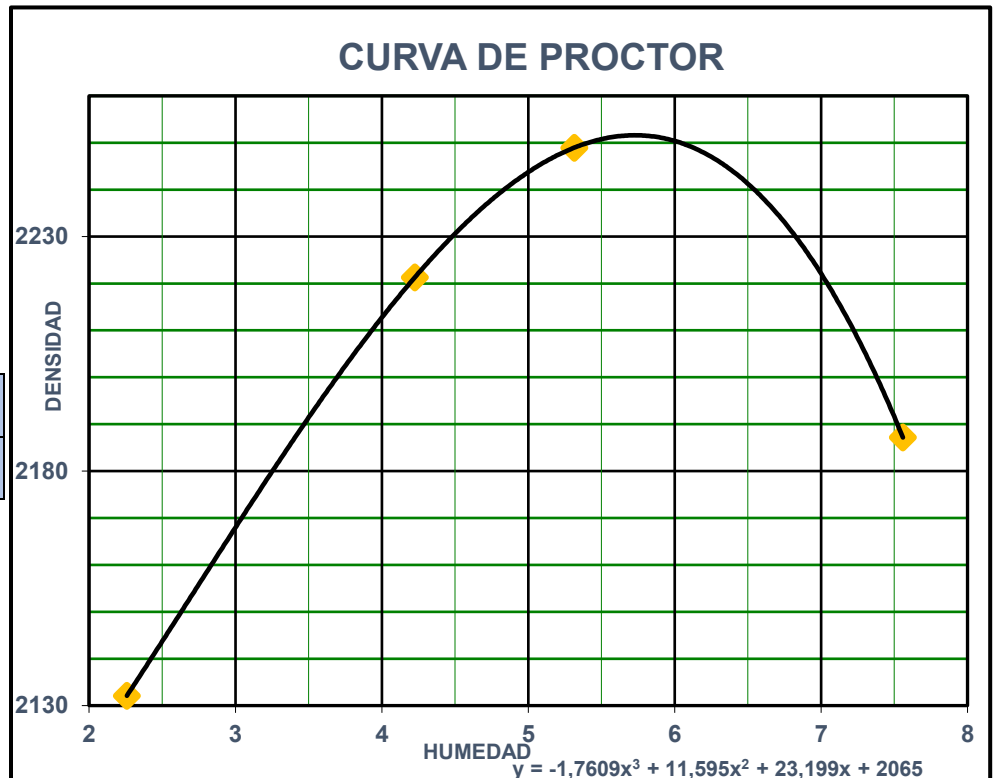
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
		<b>NORMAS TECNICAS:</b>	<b>INV E-611-13</b>
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado + Cemento <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha:</b> 28-12-2023 <b>Planilla No:</b> 12	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

SUELO RECICLADO + 3,5%CEMENTO PORTLAND (SR + 3,5%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11020	11303	11415	11382
Peso Suelo Húmedo	gr	4567	4850	4962	4929
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2170	2304	2357	2342
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	462,00	422,00	345,00	424,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	455,00	409,00	332,00	400,00
Peso Agua	gr	7,00	13,00	13,00	24,00
Peso Cápsula	gr	57,00	60,00	62,00	60,00
Peso Suelo Seco	gr	398,00	349,00	270,00	340,00
Contenido de Humedad	%	1,8	3,7	4,8	7,1
Peso Específico Seco	Kg/m3	2132	2221	2249	2187

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2252	Kg/m3
Humedad Optima	5,2	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

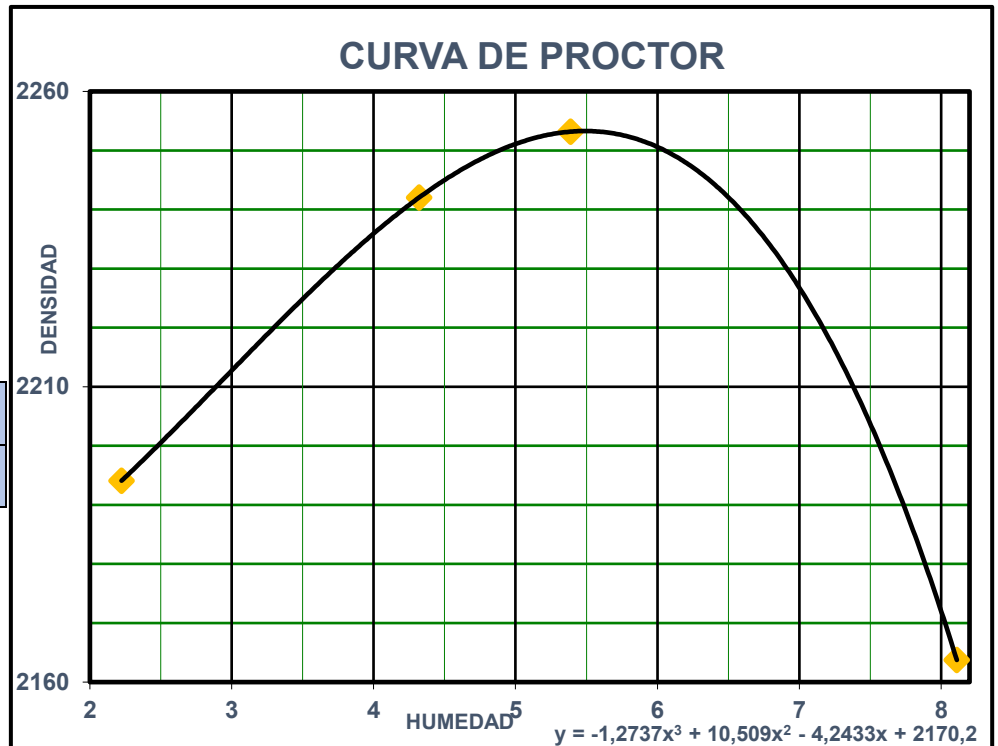
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
		<b>NORMAS TECNICAS:</b>	<b>INV E-611-13</b>
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado + Cemento <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha:</b> 28-12-2023 <b>Planilla No:</b> 13	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO PORTLAND (SR + 4%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11165	11367	11442	11368
Peso Suelo Húmedo	gr	4712	4914	4989	4915
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2238	2334	2370	2335
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	413,00	437,00	478,00	623,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	406,00	422,00	460,00	584,00
Peso Agua	gr	7,00	15,00	18,00	39,00
Peso Cápsula	gr	60,00	58,00	113,00	91,00
Peso Suelo Seco	gr	346,00	364,00	347,00	493,00
Contenido de Humedad	%	2,0	4,1	5,2	7,9
Peso Específico Seco	Kg/m3	2194	2242	2253	2164

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2253	Kg/m3
Humedad Óptima	5,3	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

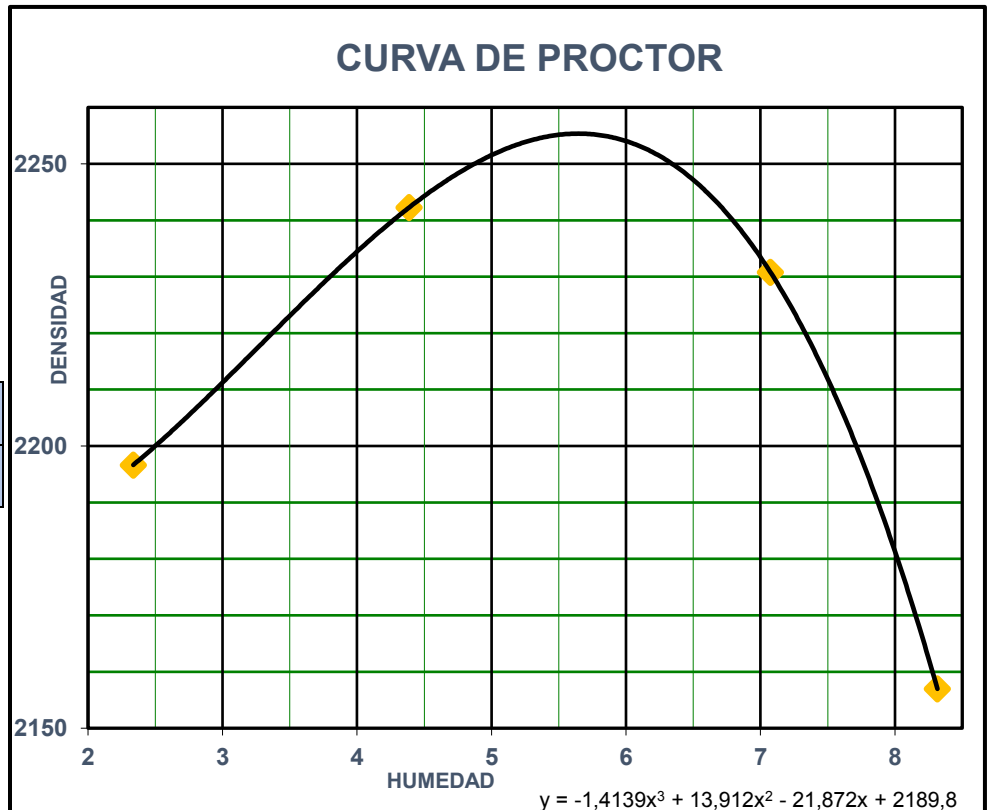
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado + Cemento <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha:</b> 29-12-2023 <b>Planilla No:</b> 14	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO PORTLAND (SR + 6%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11185	11380	11481	11371
Peso Suelo Húmedo	gr	4732	4927	5028	4918
Peso Especifico Húmedo	Kg/m3	2248	2341	2389	2336
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	541,00	510,00	527,00	461,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	530,00	491,00	496,20	430,00
Peso Agua	gr	11,00	19,00	30,80	31,00
Peso Cápsula	gr	59,30	57,90	60,80	57,20
Peso Suelo Seco	gr	470,70	433,10	435,40	372,80
Contenido de Humedad	%	2,3	4,4	7,1	8,3
Peso Especifico Seco	Kg/m3	2197	2242	2231	2157

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2255	Kg/m3
Humedad Optima	5,6	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

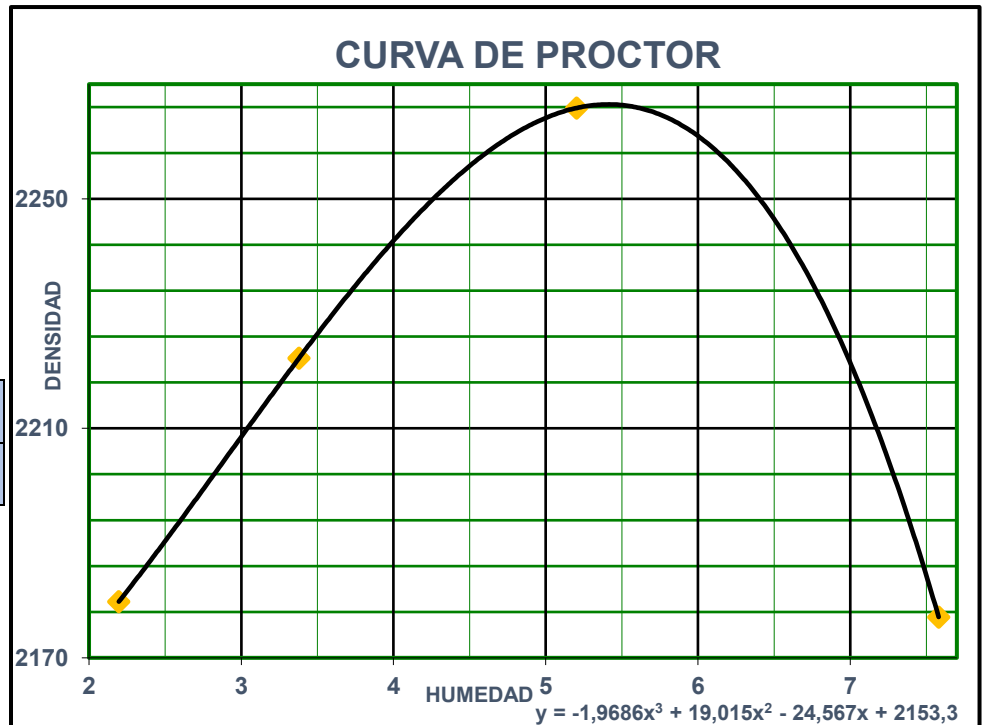
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado + Cemento <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha:</b> 29-12-2023 <b>Planilla No:</b> 15	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO PORTLAND (SR + 8%CP)


DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11156	11303	11485	11397
Peso Suelo Húmedo	gr	4703	4850	5032	4944
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2234	2304	2390	2349
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	429,00	396,00	384,00	453,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	420,00	384,00	367,00	424,00
Peso Agua	gr	9,00	12,00	17,00	29,00
Peso Cápsula	gr	59,40	57,90	58,00	56,00
Peso Suelo Seco	gr	360,60	326,10	309,00	368,00
Contenido de Humedad	%	2,5	3,7	5,5	7,9
Peso Específico Seco	Kg/m3	2180	2222	2266	2177

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2266	Kg/m3
Humedad Optima	2,7	%



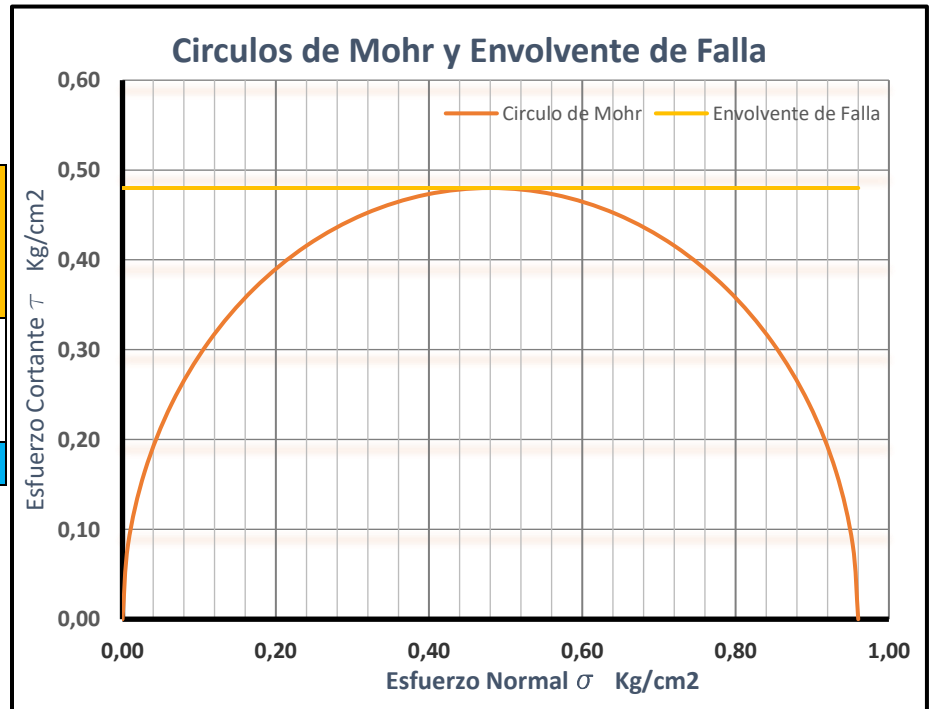
ANEXO 11. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento

		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		<b>NORMAS TECNICAS:</b> INV E-614-13	
		<b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado + Cemento <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo <b>Procedencia:</b> Santa Cruz <b>Operador:</b> Quea Poma Monica <b>Fecha de Moldeo:</b> 05/01/2024 <b>Fecha de Rotura:</b> 12/01/2024 <b>Planilla No:</b> 21	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

**SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO PORTLAND (SR + 2%CP) – GRANULAR**


No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1	2	2246	5,01	10,1	11,7	80,12	937,39	2196,9	2,34
2				10,1	11,7	80,12	937,39	2196,9	2,34
3				10,1	11,7	80,12	937,39	2196,9	2,34
								Promedio	2,34

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1	7	755	9,42	0,92
2		812	10,13	0,99
3		794	9,91	0,97
<b>Promedio</b>			9,82	0,96



PROYECTO DE GRADO

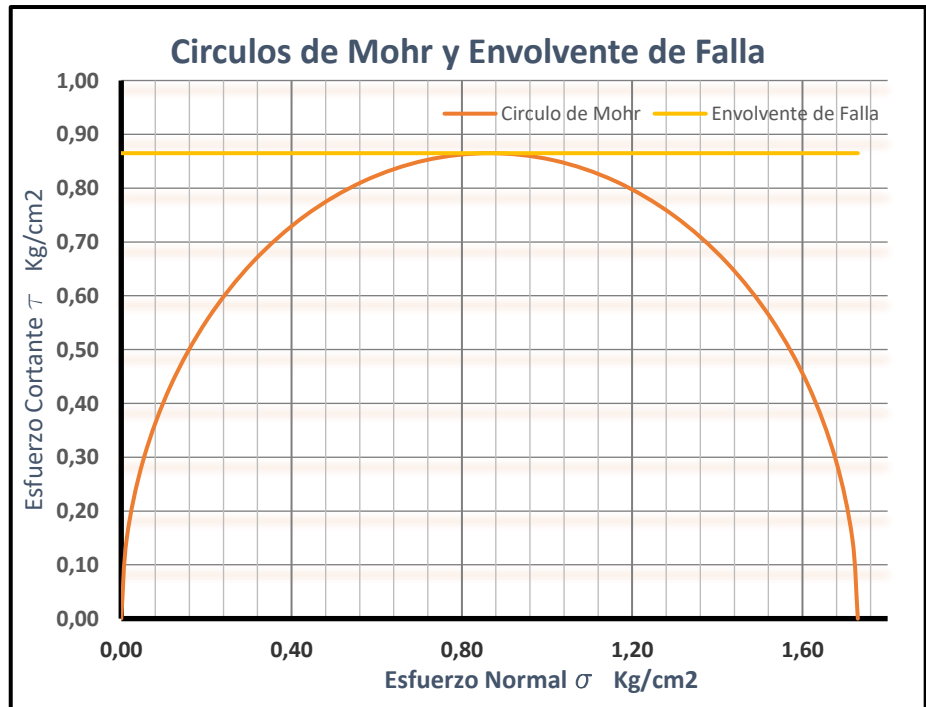
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-614-13	
		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 05/01/2024 Fecha de Rotura: 12/01/2024 Planilla No: 22	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO PORTLAND (SR + 4%CP) – GRANULAR


No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1				10,1	11,7	80,12	937,39	2195,2	2,34
2	4%	2253	5,29	10,2	11,7	81,71	956,04	2187,5	2,29
3				10,2	11,7	81,71	956,04	2203,3	2,30
								Promedio	2,31

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1		1451	18,11	1,78
2	7	1430	17,50	1,72
3		1421	17,39	1,71
Promedio			17,67	1,73



PROYECTO DE GRADO

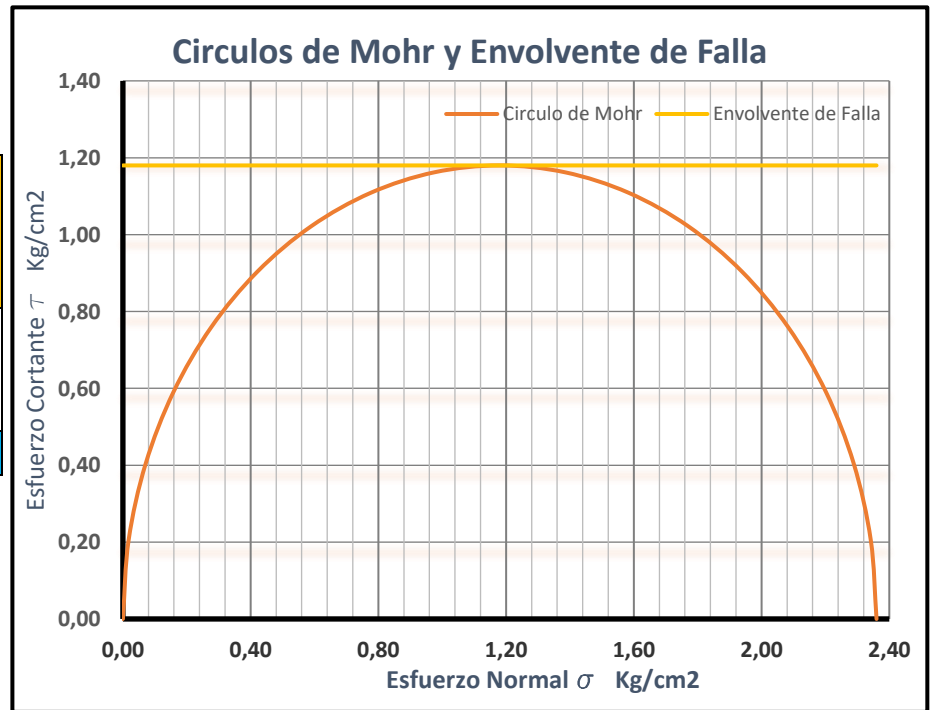
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-614-13	
		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 08/01/2024 Fecha de Rotura: 15/01/2024 Planilla No: 23	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

**SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO PORTLAND (SR + 6%CP) – GRANULAR**


No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1	6%	2255	5,65	10,1	11,7	80,12	937,39	2189	2,34
2				10,2	11,7	81,71	956,04	2188,6	2,29
3				10,2	11,7	81,71	956,04	2187	2,29
								Promedio	2,30

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1	7	1945	24,28	2,38
2		1967	24,07	2,36
3		1957	23,95	2,35
<b>Promedio</b>			24,10	2,36



PROYECTO DE GRADO

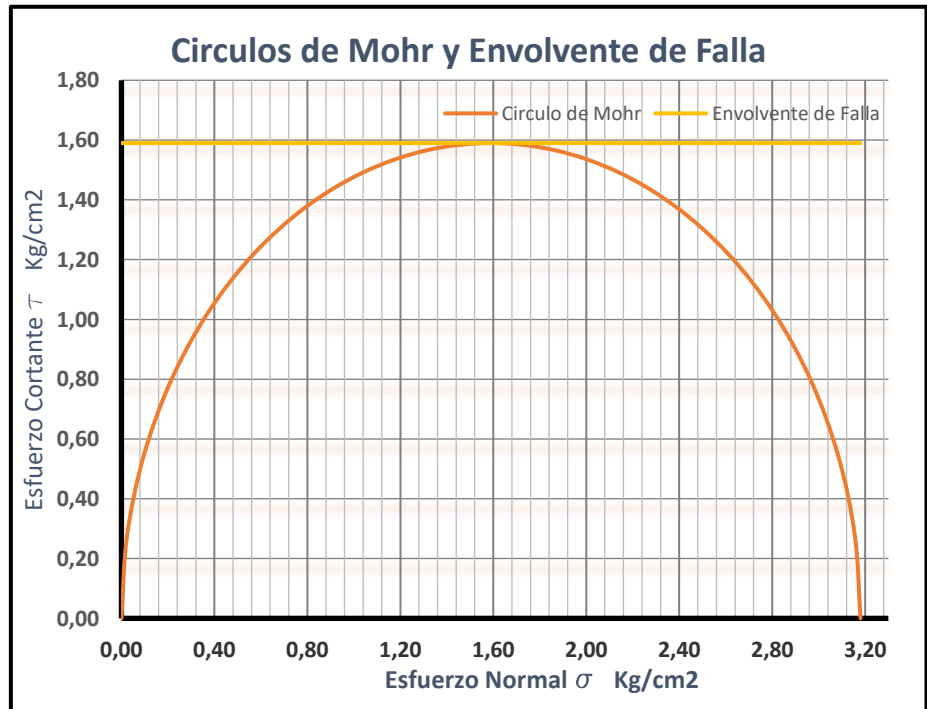
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-614-13	
		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 08/01/2024 Fecha de Rotura: 15/01/2024 Planilla No: 24	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

**SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO PORTLAND (SR + 8%CP) - GRANULAR**

No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1				10,3	11,7	83,32	974,88	2191,3	2,25
2	8%	2266	5,71	10,2	11,7	81,71	956,04	2167,1	2,27
3				10,1	11,8	80,12	945,40	2183,9	2,31
								Promedio	2,27

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1		2735	32,82	3,22
2	7	2560	31,33	3,07
3		2655	33,14	3,25
<b>Promedio</b>			<b>32,43</b>	<b>3,18</b>







PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

ANEXO 12. Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento)

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"	
 	<b>HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO</b> NORMAS TECNICAS: INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia	Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: <b>Curado:</b> 16/01/2024 - 23/01/2024 <b>12 ciclos:</b> 23/01/2024 - 19/02/2024 Planilla No: 25
<b>PROYECTO DE GRADO</b>	
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"	

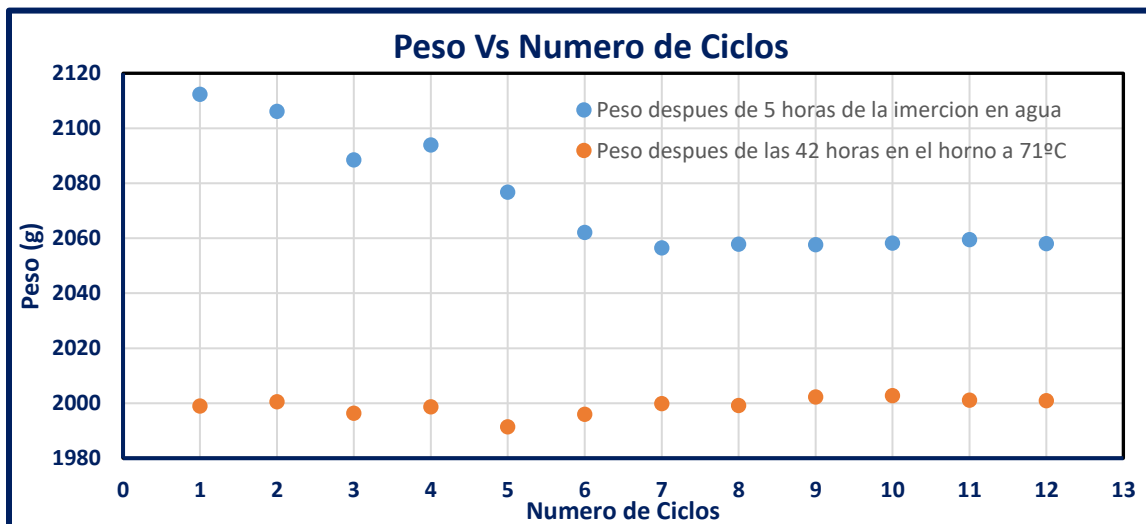
Perdida de Suelo Cemento (Suelo Reciclado + 6,10%Óptimo Cemento) **GRANULAR**

Periodo de Curado	Nº DE CICLOS %CP-OPTIMO	MASA SATURADA LUEGO DE LA INMERSIÓN	PESO SECO INICIAL	HUMEDAD	MASA LUEGO DEL CEPILLADO	PERDIDAS
CICLO DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO	CICLO 1	2113,30	2024	4,41%	2017,00	0,35%
	CICLO 2	2105,20	2019,3	4,25%	2012,60	0,33%
	CICLO 3	2070,90	2007,6	3,15%	2001,30	0,31%
	CICLO 4	2063,40	2004,9	2,92%	1998,90	0,30%
	CICLO 5	2059,40	2004,1	2,76%	1998,40	0,28%
	CICLO 6	2055,70	2003,4	2,61%	1998,20	0,26%
	CICLO 7	2054,10	2003	2,55%	1998,30	0,23%
	CICLO 8	2053,40	2002,8	2,53%	1998,40	0,22%
	CICLO 9	2051,30	2002,5	2,44%	1999,00	0,17%
	CICLO 10	2051,10	1996,9	2,71%	1993,80	0,16%
	CICLO 11	2050,80	1977,6	3,70%	1974,80	0,14%
	CICLO 12	2049,00	1969,7	4,03%	1967,50	0,11%
					<b>TOTAL=</b>	<b>2,872%</b>

Cambio de Volumen de Suelo Cemento (Suelo Reciclado + 6,1%Optimo Cemento)

GRANULAR

Nº DE CICLOS	Peso después de 5 horas de la inmersión en agua	Peso después de las 42 horas en el horno a 71°C	Diámetro cm	Altura cm	Volumen cm <sup>3</sup>	%Humedad	Variación de Volumen
1	2112,40	1999,00	10,18	11,68	950,67	5,67%	0,56
2	2106,20	2000,60	10,17	11,67	947,99	5,28%	0,84
3	2088,50	1996,40	10,16	11,65	944,50	4,61%	1,21
4	2094,00	1998,70	10,16	11,66	945,31	4,77%	1,12
5	2076,80	1991,50	10,16	11,66	945,31	4,28%	1,12
6	2062,20	1996,00	10,13	11,62	936,52	3,32%	2,04
7	2056,50	1999,90	10,11	11,62	932,82	2,83%	2,43
8	2057,90	1999,20	10,12	11,62	934,67	2,94%	2,24
9	2057,70	2002,30	10,12	11,61	933,86	2,77%	2,32
10	2058,30	2002,80	10,11	11,61	932,02	2,77%	2,51
11	2059,50	2001,20	10,11	11,61	932,02	2,91%	2,51
12	2058,10	2001,00	10,10	11,61	930,18	<b>2,854%</b>	<b>2,71</b>



### 7.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA COMBINADA ENTRE SUELO RECICLADO CON CEMENTO Y ADICIÓN

ANEXO 13. Relación Humedad-Densidad de la mezcla compactadas de Suelo-Cemento

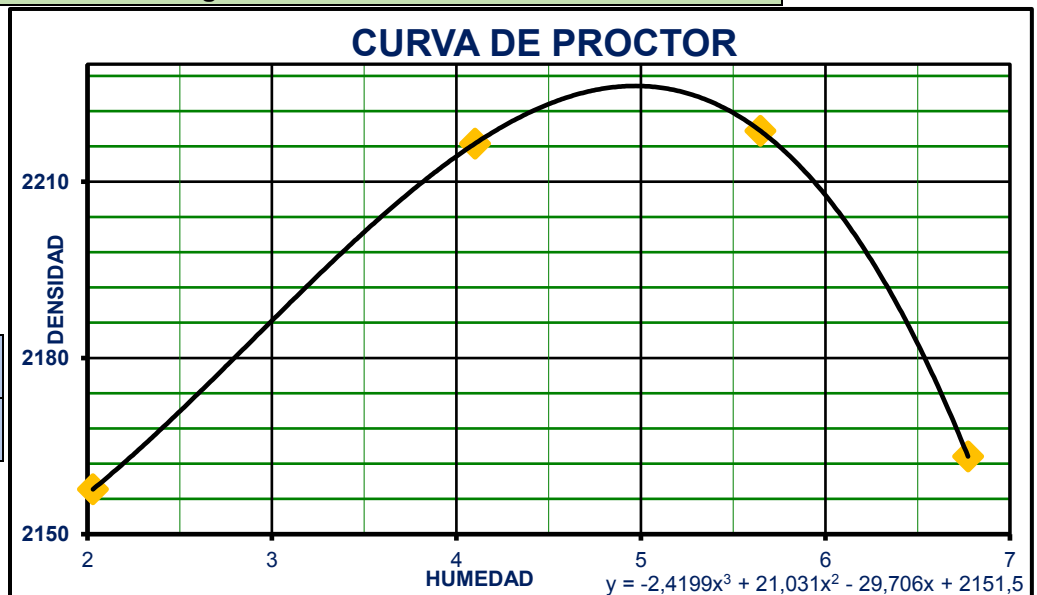
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		NORMAS TECNICAS: INV E-611-13 Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 17/01/2024 Planilla No: 26	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 1%CEMENTO + 2% NovoCrete\*1%CEMENTO  
(SR + 1%CP + 2%NC\*1%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11087	11310	11387	11315
Peso Suelo Húmedo	gr	4634	4857	4934	4862
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2201	2307	2344	2310
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	667,00	571,00	540,00	643,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	656,00	553,00	516,00	609,00
Peso Agua	gr	11,00	18,00	24,00	34,00
Peso Cápsula	gr	114,00	114,00	91,00	107,00
Peso Suelo Seco	gr	542,00	439,00	425,00	502,00
Contenido de Humedad	%	2,0	4,1	5,6	6,8
Peso Específico Seco	Kg/m3	2158	2216	2219	2163

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2226	Kg/m3
Humedad Optima	5,0	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

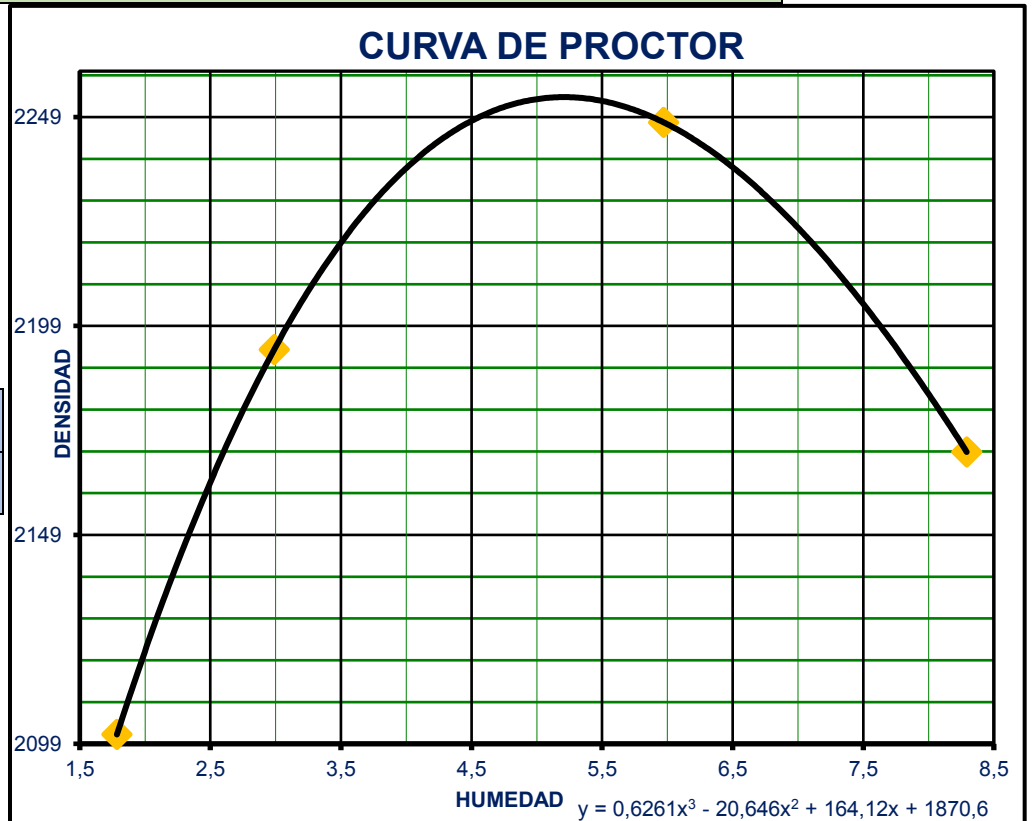
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 17/01/2024 Planilla No: 27	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 2%CEMENTO  
(SR + 2%CP + 2%NC\*2%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	10955	11208	11467	11397
Peso Suelo Húmedo	gr	4502	4755	5014	4944
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2139	2259	2382	2349
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	396,90	252,40	385,10	305,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	391,00	246,80	366,70	288,30
Peso Agua	gr	5,90	5,60	18,40	16,70
Peso Cápsula	gr	60,30	59,40	58,50	86,90
Peso Suelo Seco	gr	330,70	187,40	308,20	201,40
Contenido de Humedad	%	1,8	3,0	6,0	8,3
Peso Específico Seco	Kg/m3	2101	2193	2248	2169

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2254	Kg/m3
Humedad Óptima	5,2	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

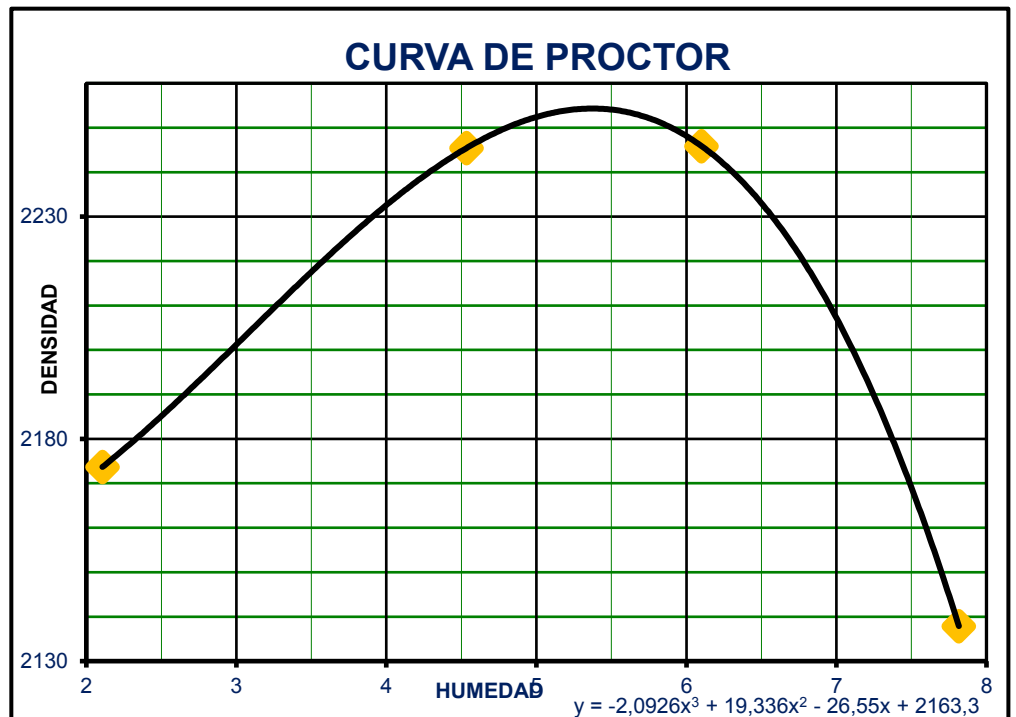
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 18/01/2024 Planilla No: 28	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 4%CEMENTO  
(SR + 4%CP + 2%NC\*4%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11125	11394	11469	11305
Peso Suelo Húmedo	gr	4672	4941	5016	4852
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2219	2347	2383	2305
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	646,00	575,00	491,00	576,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	635,00	555,00	468,00	542,00
Peso Agua	gr	11,00	20,00	23,00	34,00
Peso Cápsula	gr	113,00	114,00	91,00	107,00
Peso Suelo Seco	gr	522,00	441,00	377,00	435,00
Contenido de Humedad	%	2,1	4,5	6,1	7,8
Peso Específico Seco	Kg/m3	2174	2245	2246	2138

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2254	Kg/m3
Humedad Óptima	5,4	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

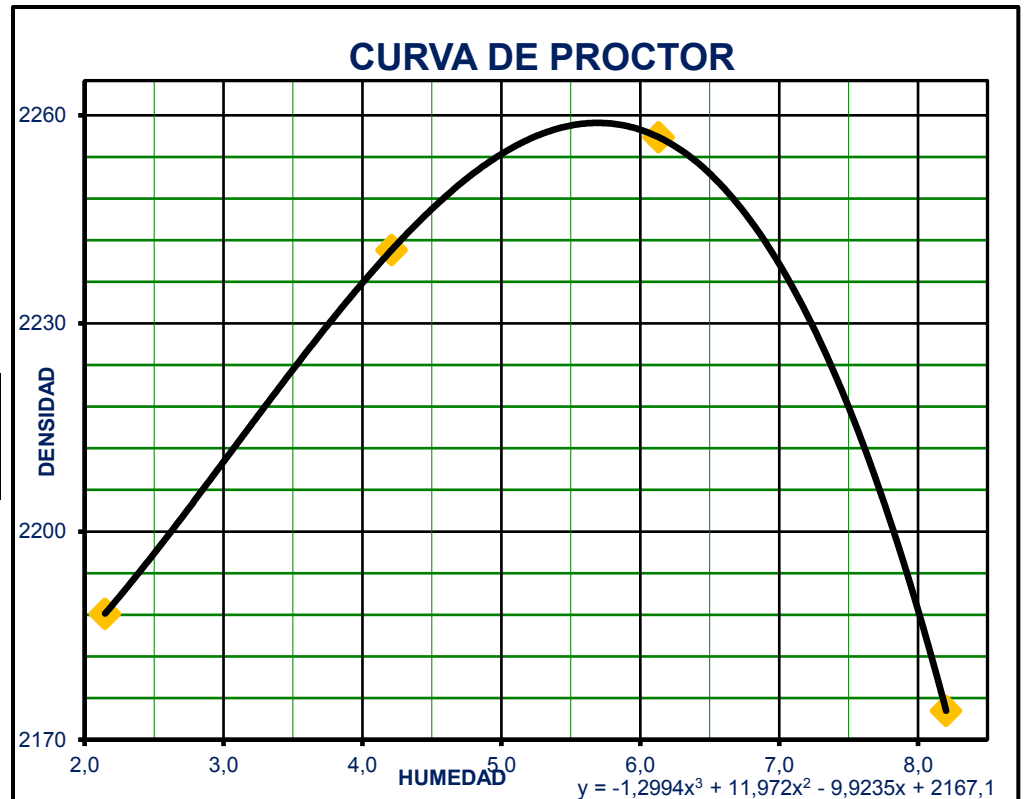
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 18/01/2024 Planilla No: 29	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 6%CEMENTO  
(SR + 6%CP + 2%NC\*6%CP)

DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11158	11368	11495	11405
Peso Suelo Húmedo	gr	4705	4915	5042	4952
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2235	2335	2395	2352
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	536,00	379,00	408,00	401,00
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	526,00	366,00	388,00	375,00
Peso Agua	gr	10,00	13,00	20,00	26,00
Peso Cápsula	gr	60,30	57,20	61,90	58,00
Peso Suelo Seco	gr	465,70	308,80	326,10	317,00
Contenido de Humedad	%	2,1	4,2	6,1	8,2
Peso Específico Seco	Kg/m3	2188	2241	2257	2174

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2259	Kg/m3
Humedad Óptima	5,7	%



PROYECTO DE GRADO

"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"

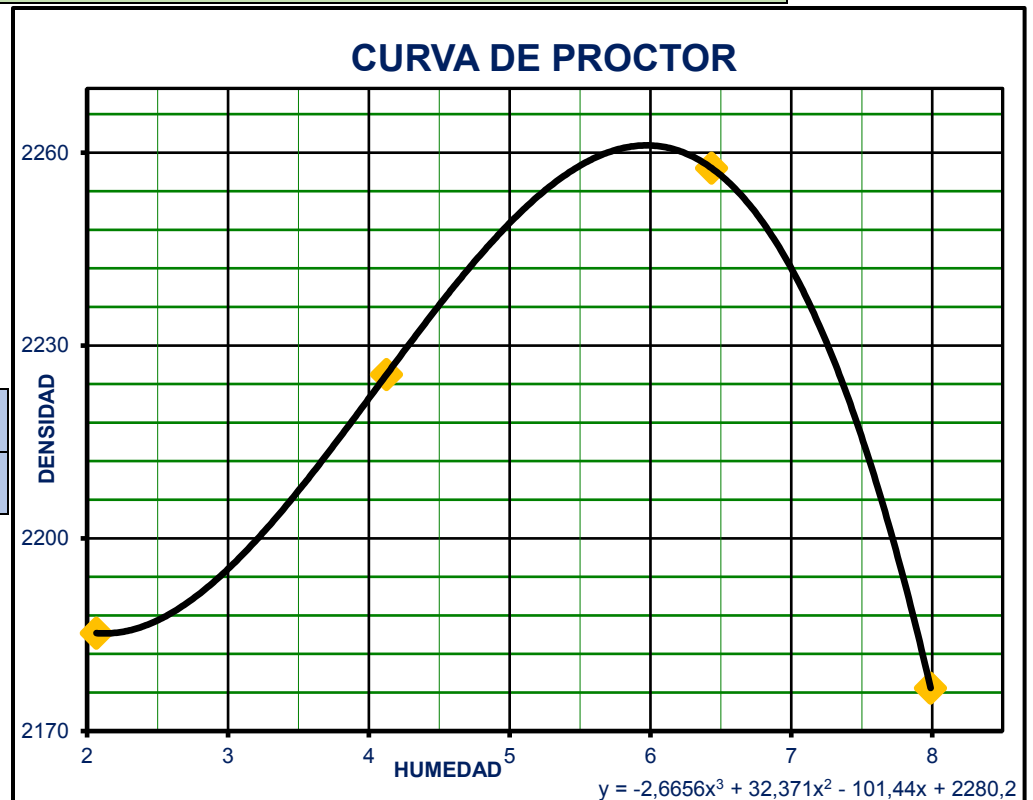
		<b>RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE LA MEZCLA COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		NORMAS TECNICAS:	INV E-611-13
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha: 19/01/2024 Planilla No: 30	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 8%CEMENTO  
(SR + 8%CP + 2%NC\*8%CP)


DATOS DE ENSAYO	Unidad	1	2	3	4
Peso del Molde + Suelo Húmedo	gr	11148	11331	11511	11401
Peso Suelo Húmedo	gr	4695	4878	5058	4948
Peso Específico Húmedo	Kg/m3	2230	2317	2403	2351
Cápsula No	TARA	5	1	2	4
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	gr	578,40	506,50	501,80	647,30
Peso Cápsula + Suelo Seco	gr	569,00	488,80	478,10	610,40
Peso Agua	gr	9,40	17,70	23,70	36,90
Peso Cápsula	gr	114,10	59,90	109,80	148,50
Peso Suelo Seco	gr	454,90	428,90	368,30	461,90
Contenido de Humedad	%	2,1	4,1	6,4	8,0
Peso Específico Seco	Kg/m3	2185	2225	2258	2177

DATOS DEL MOLDE	
VOLUMEN DEL MOLDE: "C"	2105
PESO DEL MOLDE	6453

Densidad Máxima	2261	Kg/m3
Humedad Óptima	6,0	%



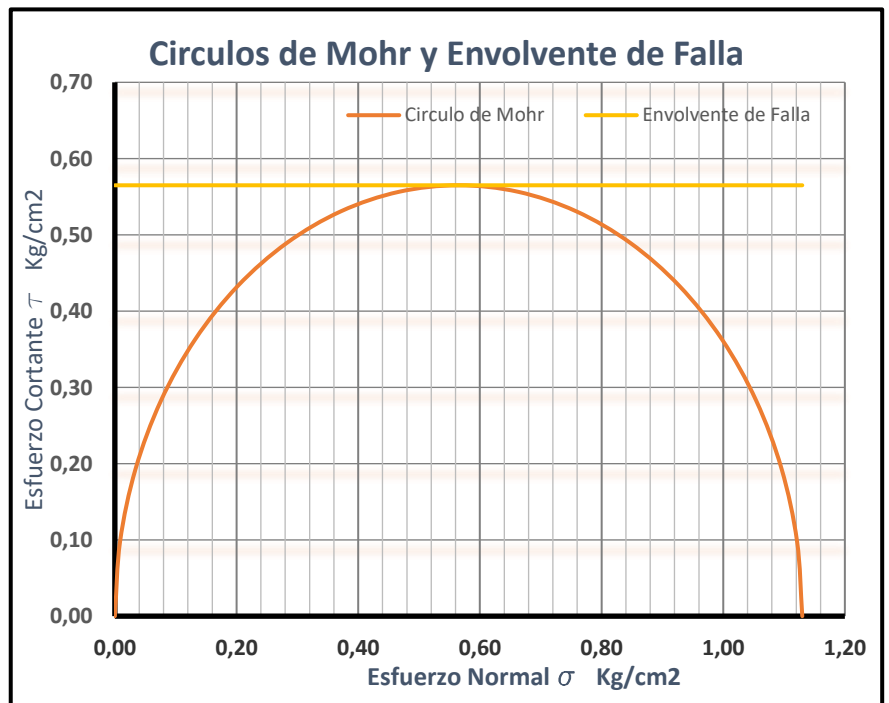
ANEXO 14. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de Suelo-Cemento

 <p><b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia</p>	<p><b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b></p> <p>NORMAS TECNICAS: INV E-614-13</p>
	<p>Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 24/01/2024 Fecha de Rotura: 31/01/2024 Planilla No: 31</p>
<p><b>PROYECTO DE GRADO</b></p> <p>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</p>	


SUELO RECICLADO + 2%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 2%CEMENTO  
(SR + 2%CP + 2%NC\*2%CP) - GRANULAR

No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1				10,15	11,8	80,93	954,97	2230,1	2,34
2	2%	2222	4,87	10,154	11,7	80,98	947,44	2214,1	2,34
3				10,161	11,6	81,09	940,63	2201,3	2,34
								Promedio	2,34

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1		910	11,24	1,10
2	7	915	11,30	1,11
3		985	12,15	1,19
		Promedio	11,56	1,13



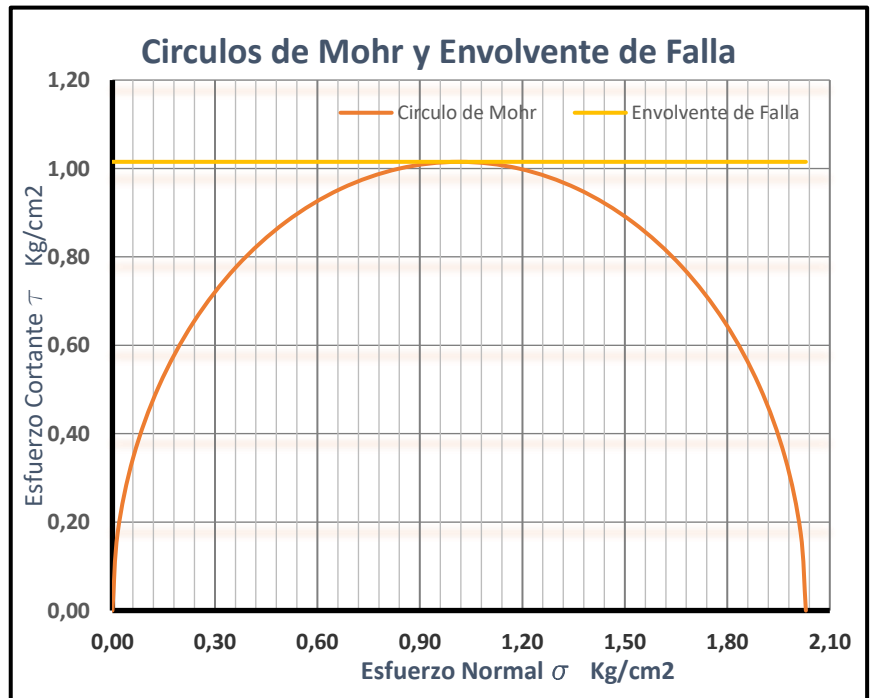


		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		NORMAS TECNICAS: INV E-614-13	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 25/01/2024 Fecha de Rotura: 01/02/2024 Planilla No: 32	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"			

SUELO RECICLADO + 4%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 4%CEMENTO  
 (SR + 4%CP + 2%NC\*4%CP)


No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1				10,18	11,7	81,39	952,29	2221	2,33
2	4%	2222	4,87	10,15	11,8	80,91	954,78	2226,4	2,33
3				10,18	11,7	81,39	952,29	2221,9	2,33
								Promedio	2,33

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1		1645	20,21	1,98
2	7	1580	19,53	1,91
3		1830	22,48	2,20
<b>Promedio</b>			20,74	2,03



PROYECTO DE GRADO

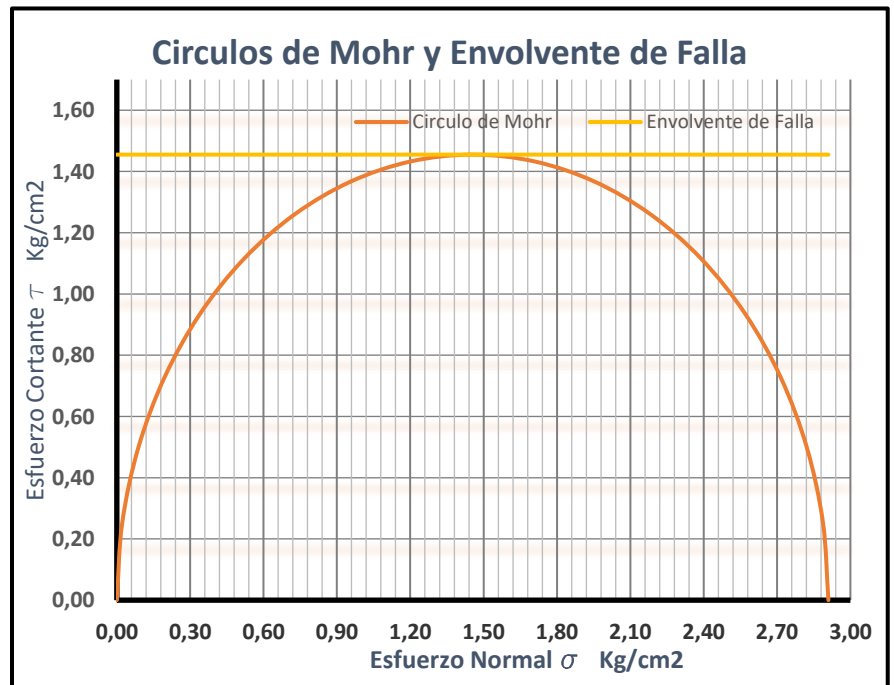
"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"


		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		<b>NORMAS TECNICAS: INV E-614-13</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 26/01/2024 Fecha de Rotura: 02/02/2024 Planilla No: 33	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			

**SUELO RECICLADO + 6%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 6%CEMENTO**  
**(SR + 6%CP + 2%NC\*6%CP)**

No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1				10,17	11,8	81,23	958,55	2226,5	2,32
2	6%	2222	4,87	10,16	11,7	81,07	948,56	2229,3	2,35
3				10,19	11,8	81,07	956,66	2196,5	2,30
								Promedio	2,32

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1		2401	29,56	2,90
2	7	2408	29,70	2,91
3		2415	29,79	2,92
<b>Promedio</b>			29,68	2,91

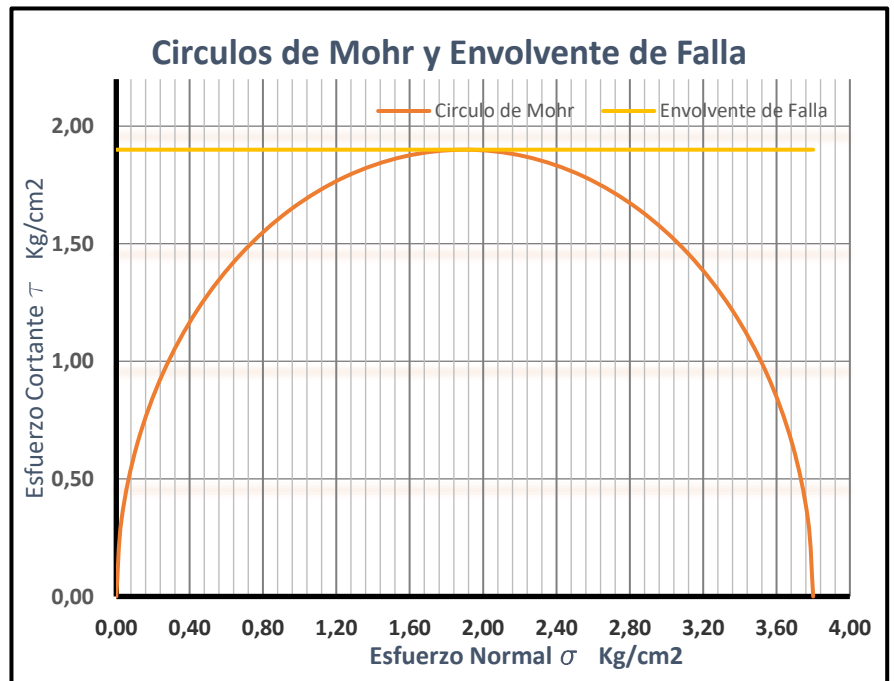


		<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b>	
		<b>NORMAS TECNICAS: INV E-614-13</b>	
<b>EMAVIAS</b> Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES" La Paz - Bolivia		Condiciones: Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete Muestra: Reciclado Profundo Procedencia: Santa Cruz Operador: Quea Poma Monica Fecha de Moldeo: 26/01/2024 Fecha de Rotura: 02/02/2024 Planilla No: 34	
<b>PROYECTO DE GRADO</b>			
<b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b>			


**SUELO RECICLADO + 8%CEMENTO + 2% NovoCrete \* 8%CEMENTO**  
**(SR + 8%CP + 2%NC\*8%CP)**

No-Probeta	Cemento %	Densidad Máxima Kg/m3	Humedad Optima %	Diámetro cm	Altura cm	Área cm2	Volumen cm3	Peso Rotura	Densidad Rotura
1				10,1	11,7	80,77	945,01	2214,9	2,34
2	8%	2222	4,87	10,2	11,7	81,26	950,80	2208,6	2,32
3				10,2	11,7	81,18	949,86	2223	2,34
								Promedio	2,34

No-Probeta	Edad Días	Carga Rotura kg	Tensión Rotura kg/cm2	Tensión Rotura Mpa
1		3125	38,69	3,79
2	7	3185	39,19	3,84
3		3105	38,25	3,75
<b>Promedio</b>			38,71	3,80



ANEXO 15. Ensayo de Durabilidad (Humedecimiento y Secado de Mezclas de Suelo-Cemento)

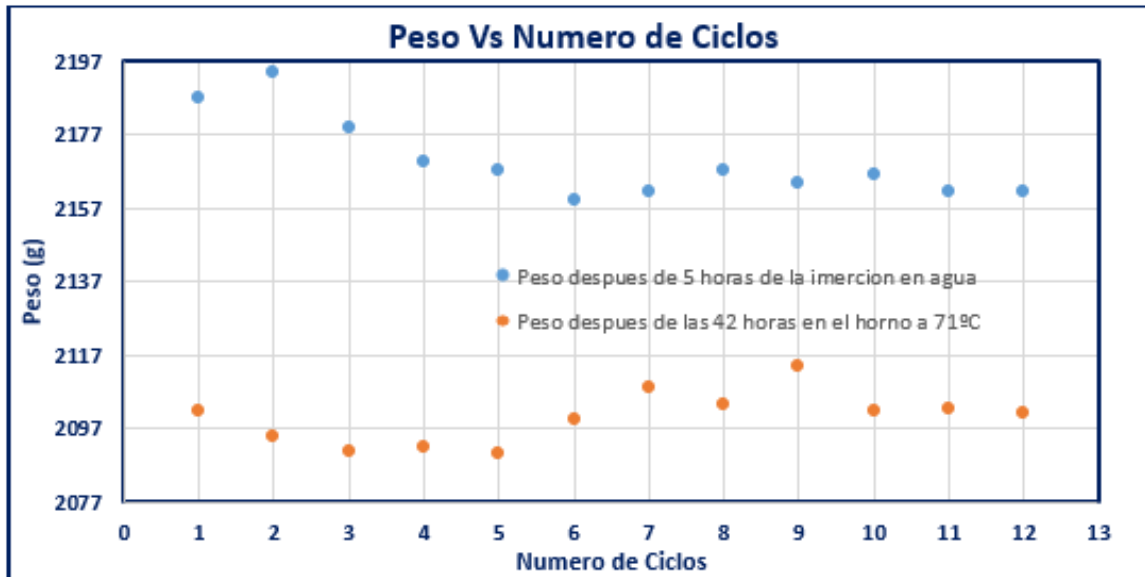
	<p align="center"><b>HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO más NovoCrete</b></p> <p align="right">NORMAS TECNICAS: INV E-611-13</p>
<p align="center"><b>EMAVIAS</b>                  Empresa Municipal de Asfaltos y Vías "LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES"                  La Paz - Bolivia</p>	<p><b>Condiciones:</b> Suelo Reciclado + Cemento + NovoCrete  <b>Muestra:</b> Reciclado Profundo  <b>Procedencia:</b> Santa Cruz  <b>Operador:</b> Quea Poma Monica  <b>Fecha:</b> Curado: 05/02/2024 - 12/02/2024                  12 ciclos: 12/02/2024 - 15/03/2024  <b>Planilla No:</b> 35</p>
<p align="center"><b>PROYECTO DE GRADO</b></p>	
<p align="center"><b>"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"</b></p>	

Perdida de Suelo Reciclado + 5,0%OptimoCemento+2%NovoCrete\*5,0%Optimo  
 Cemento **GRANULAR**

Periodo de Curado	Nº DE CICLOS %CP-OPTIMO	MASA SATURADA LUEGO DE LA INMERSIÓN	PESO SECO INICIAL	HUMEDAD	MASA LUEGO DEL CEPILLADO	PERDIDAS
<b>CICLO DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO</b>	CICLO 1	2222,00	2132,30	4,21%	2129,60	0,13%
	CICLO 2	2195,20	2128,50	3,13%	2125,60	0,14%
	CICLO 3	2185,60	2125,30	2,84%	2122,20	0,15%
	CICLO 4	2175,90	2120,00	2,64%	2116,00	0,19%
	CICLO 5	2172,00	2115,70	2,66%	2111,40	0,20%
	CICLO 6	2160,60	2114,80	2,17%	2110,00	0,23%
	CICLO 7	2166,30	2098,30	3,24%	2093,30	0,24%
	CICLO 8	2164,40	2097,20	3,20%	2091,80	0,26%
	CICLO 9	2163,20	2076,60	4,17%	2070,90	0,27%
	CICLO 10	2165,90	2068,00	4,73%	2061,20	0,33%
	CICLO 11	2160,60	2057,00	5,04%	2052,00	0,24%
	CICLO 12	2159,90	2055,00	5,10%	2053,00	0,10%
					<b>TOTAL=</b>	<b>2,467%</b>

Cambio de Volumen de Suelo Reciclado + 5,0 % Optimo Cemento + 2 % NovoCrete \*  
 5,0% Optimo Cemento **GRANULAR**

Nº DE CICLOS	Peso después de 5 horas de la inmersión en agua	Peso después de las 42 horas en el horno a 71°C	Diámetro cm	Altura cm	Volumen cm <sup>3</sup>	%Humedad	Variación de Volumen
1	2187,00	2101,60	10,17	11,68	948,80	4,06%	0,76
2	2194,10	2094,90	10,17	11,68	948,80	4,74%	0,76
3	2179,10	2090,50	10,17	11,67	947,99	4,24%	0,84
4	2169,80	2092,10	10,16	11,67	946,12	3,71%	1,04
5	2167,10	2090,20	10,15	11,67	944,26	3,68%	1,23
6	2159,00	2099,50	10,15	11,65	942,64	2,83%	1,40
7	2161,40	2108,30	10,15	11,65	942,64	2,52%	1,40
8	2167,20	2103,70	10,15	11,65	942,64	3,02%	1,40
9	2164,10	2113,80	10,14	11,64	939,98	2,38%	1,68
10	2166,10	2101,70	10,14	11,63	939,17	3,06%	1,76
11	2161,80	2102,30	10,12	11,62	934,67	2,83%	2,24
12	2161,50	2101,20	10,12	11,60	933,06	2,87%	2,40



## **UMSA - CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Nombre:** MONICA QUEA POMA

**Cel.:** 72513457

**Correo:** [monicaqueapoma@gmail.com](mailto:monicaqueapoma@gmail.com)



2024-TTES-1390-D-1

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS**  
**RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-3099/2024**  
**La Paz, 10 de octubre de 2024**

**VISTOS:**

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **04 de octubre de 2024**, por **MONICA QUEA POMA** con **C.I. N° 9171095 LP**, con número de trámite **DA 1756/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

**CONSIDERANDO:**

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena"*



*fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.*

**POR TANTO:**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RECICLADO PROFUNDO DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE CON ADICIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CEMENTO PORTLAND Y CEMENTO PORTLAND MÁS NOVOCRETE**" a favor de la autora y titular: **MONICA QUEA POMA** con **C.I. N° 9171095 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI  
**CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO**  
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS**  
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



y3Aqr5Xx7Oq96j

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB [www.senapi.gob.bo/verificacion](http://www.senapi.gob.bo/verificacion) Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz  
Av. Montes, N° 515,  
entre Esq. Uruguay y  
C. Batallón Illimani.  
Telfs.: 2115700  
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz  
Av. Uruguay, Calle  
prolongación Quijarro,  
N° 29, Edif. Bicentenario.  
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolívar, N° 737,  
entre 16 de Julio y Antezana.  
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2560  
Edif. Multicentro El Ceibo  
Ltda. Piso 2, Of. 5B,  
Zona 16 de Julio.  
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca  
Calle Kilómetro 7, N° 366  
casi esq. Urriolagoitia,  
Zona Parque Bolívar.  
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija  
Av. La Paz, entre  
Calles Ciro Trigo y Avaroa  
Edif. Santa Clara, N° 243.  
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre, N° 5837,  
entre Ayacucho  
y Junín, Galería Central,  
Of. 14.  
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí  
Av. Villazón entre calles  
Wenceslao Alba y San Alberto,  
Edif. AM. Salinas N° 242,  
Primer Piso, Of. 17.  
Telf.: 72018160

