



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Informe: LM-PI-UMP-079-R1

# CALIBRACIÓN DE ESPECIFICACIONES PARA BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO EN COSTA RICA

## INFORME DE AVANCE

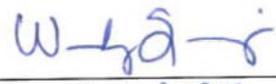
Preparado por:

Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica

Setiembre, 2018



<b>1. Informe</b> LM-PI-UMP-079-R1		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> CALIBRACIÓN DE ESPECIFICACIONES PARA BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO EN COSTA RICA		<b>4. Fecha del Informe</b> Setiembre, 2018
<b>7. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>8. Notas complementarias</b>		
<b>9. Resumen</b>  <i>Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa muy importante para la construcción de pavimentos. Su aporte estructural, la variabilidad de materiales en las distintas zonas del país, el clima lluvioso y la presencia de zonas con niveles freáticos altos favorecen la aplicación de esta tecnología. En general, la técnica permite aumentar la vida útil de los pavimentos y a la vez permite disminuir la frecuencia en el mantenimiento.</i>  <i>Actualmente en Costa Rica se invierten 125 mil millones de colones en la conservación de las carreteras pavimentadas que forman parte de la red vial nacional (CONAVI, 2017), donde más del 50% (MOPT, 2017) están siendo rehabilitadas o construidas utilizando bases estabilizadas con cemento. Por lo tanto, esta investigación pretende aportar en la calibración de especificaciones para el diseño, construcción y desempeño de las capas de bases granular estabilizadas que permitan derivar en una mejora en el uso de recursos y resultados obtenidos, buscando generar carreteras más duraderas y a un menor costo.</i>		
<b>10. Palabras clave</b> Bases Estabilizadas, BE 25, Materiales Granulares	<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 35
<b>13. Preparado por:</b> <b>Ing. Tania Ávila Esquivel, M.Sc.</b> Investigadora UMP   Fecha: 2/10/18	<b>Ing. Wendy Sequeira Rojas, M.Sc.</b> Coordinadora UAT   Fecha: 2/10/18	
<b>14. Revisado por:</b> <b>Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.</b> Coordinador UMP   Fecha: 2/10/18		<b>15. Aprobado por:</b> <b>Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D.</b> Coordinador General PITRA   Fecha: 1/1



## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	3
ÍNDICE DE TABLAS .....	4
RESUMEN EJECUTIVO .....	5
1 INTRODUCCIÓN .....	5
1.1 Objetivos .....	5
1.2 Metodología .....	6
1.3 Justificación.....	6
1.4 Grupo investigador.....	7
2 FASE I: Tramos de prueba en campo .....	7
2.1 Municipalidad de Cartago .....	7
2.2 Municipalidad de Mora .....	15
3 FASE II: Ensayos de laboratorio.....	24
3.1 Variación de parámetros de diseño .....	24
3.2 Vida a la fatiga .....	30
3.3 Ensayo a escala natural .....	34
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA METODOLÓGICO DEL PROYECTO .....	6
FIGURA 2. MAPA DE UBICACIÓN DEL TRAMO ESTABILIZADO CON CEMENTO .....	8
FIGURA 3. GRANULOMETRÍA DE LA BASE GRANULAR.....	9
FIGURA 4. DISEÑO DE LA BE-25 FINALMENTE COLOCADO .....	10
FIGURA 5. ARREGLO DE SECCIONES ESTABILIZADAS CON CEMENTO EN EL TRAMO DE PRUEBA .....	11
FIGURA 6. IMÁGENES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO .....	11
FIGURA 7. TRATAMIENTO SUPERFICIAL COLOCADO EN EL SITIO DE OBRA .....	12
FIGURA 8. DATOS DE FALLA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE ESPECÍMENES MUESTREADOS EN CAMPO ....	13
FIGURA 9. NÚCLEOS EXTRAÍDOS EN EL SITIO DE OBRA .....	13
FIGURA 10. DATOS DE FWD EN TRAMO ESTABILIZADO CON CEMENTO DE CARTAGO .....	14
FIGURA 11. MAPA DE UBICACIÓN DEL TRAMO ESTABILIZADO CON CEMENTO (TRAMO 4).....	16
FIGURA 12. DISEÑO DE BASE ESTABILIZADA. FUENTE: INFORME 4947-2016 DE CACISA .....	17
FIGURA 13. UBICACIÓN DE SONDEOS DE DCP REALIZADOS EN EL TRAMO 4.....	18
FIGURA 14. SONDEOS REALIZADOS CON EL DCP A LA SUBRASANTE.....	19
FIGURA 15. GRANULOMETRÍA DE LA SUBRASANTE. FUENTE: INFORME I-1341-16 DEL LANAMMEUCR.....	20

Informe LM-PI-UMP-075-P	Setiembre, 2018	Página 3 de 35
-------------------------	-----------------	----------------



**FIGURA 16.** GRANULOMETRÍA DE LA BASE GRANULAR. FUENTE: INFORME 4947-2016 DE CACISA ..... 20

**FIGURA 17.** PROCESO CONSTRUCTIVO ..... 21

**FIGURA 18.** DATOS DE FALLA A LA COMPRESIÓN DEL TRAMO DE MORA ..... 22

**FIGURA 19.** ESQUEMA DE MEDICIONES ..... 23

**FIGURA 20.** MÓDULOS RESILIENTES RETROCALCULADOS DEL TRAMO ESTABILIZADO CON CEMENTO EN MORA ..... 23

**FIGURA 21.** ESQUEMA EXPERIMENTAL PARA MEDIR LA VARIABILIDAD EN LA RESISTENCIA DE LAS BASES ESTABILIZADAS VARIANDO LOS PARÁMETROS DE DISEÑO ..... 25

**FIGURA 22.** RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO ..... 27

**FIGURA 23.** ESQUEMA EXPERIMENTAL COMPLEMENTARIO ..... 28

**FIGURA 24.** RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA UN 3% DE CEMENTO ADICIONADO ..... 29

**FIGURA 25.** RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA UN 5% DE CEMENTO ADICIONADO ..... 29

**FIGURA 26.** MONTAJE FINAL ..... 33

**FIGURA 27.** DATOS DE MÓDULO RESILIENTE RETROCALCULADO CON RESPECTO AL NÚMERO DE APLICACIONES DE CARGA A LA FALLA ..... 34

## ÍNDICE DE TABLAS

**TABLA 1.** RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ..... 7

**TABLA 2.** DATOS DE FALLA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA DE ESPECÍMENES MUESTREADOS EN CAMPO ..... 12

**TABLA 3.** DATOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE NÚCLEOS EXTRAÍDOS ..... 14

**TABLA 4.** RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE PROBETAS TRAMO DE MORA ..... 21

**TABLA 5.** PROPIEDADES DEL MATERIAL GRANULAR ..... 24

**TABLA 6.** GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL GRANULAR ..... 24

**TABLA 7.** RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LOS PARÁMETROS DE DISEÑO DE LAS BASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO ..... 26

**TABLA 8.** COMPARACIÓN PORCENTUAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ..... 30

## RESUMEN EJECUTIVO

Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa muy importante para la construcción de pavimentos. Su aporte estructural, la variabilidad de materiales en las distintas zonas del país, el clima lluvioso y la presencia de zonas con niveles freáticos altos favorecen la aplicación de esta tecnología. En general, la técnica permite aumentar la vida útil de los pavimentos y a la vez permite disminuir la frecuencia en el mantenimiento.

Actualmente en Costa Rica se invierten 125 mil millones de colones en la conservación de las carreteras pavimentadas que forman parte de la red vial nacional (CONAVI, 2017), donde más del 50% (MOPT, 2017) están siendo rehabilitadas o construidas utilizando bases estabilizadas con cemento.

Por lo tanto, esta investigación pretende aportar en la calibración de especificaciones para el diseño, construcción y desempeño de las capas de bases granular estabilizadas que permitan derivar en una mejora en el uso de recursos y resultados obtenidos, buscando generar carreteras más duraderas y a un menor costo.

## 1 INTRODUCCIÓN

Este informe busca presentar los resultados obtenidos a la fecha como parte del proyecto de investigación titulado *Calibración de especificaciones para bases estabilizadas con cemento en Costa Rica*.

A continuación, se presenta un resumen del esquema experimental planteado inicialmente.

### 1.1 Objetivos

#### 1.1.1 General

Calibrar especificaciones para el diseño, construcción y desempeño de las capas de base granular estabilizadas con cemento utilizadas como parte de una estructura de pavimento.

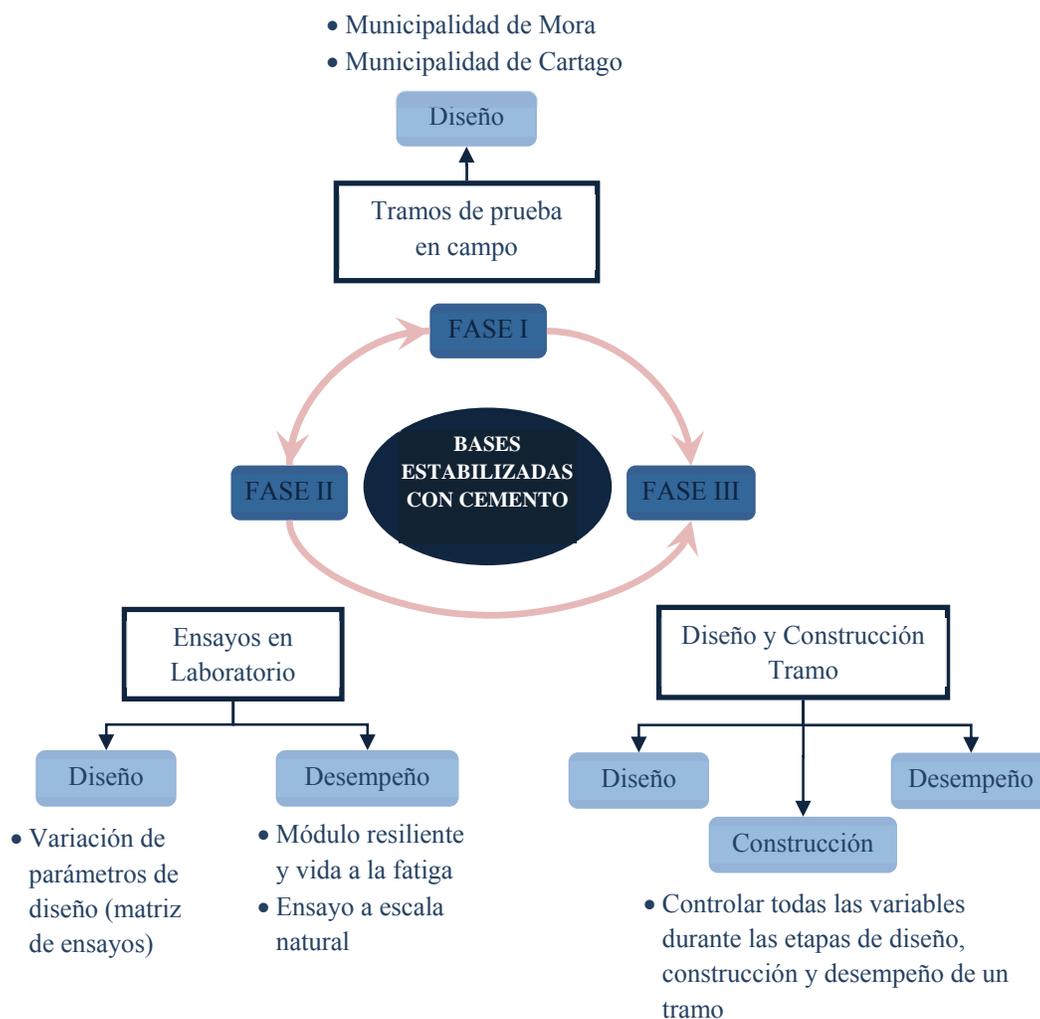
#### 1.1.2 Específicos

- Evaluar las variaciones en laboratorio del comportamiento y propiedades físico-mecánicas de materiales estabilizados con cemento al modificar los parámetros de diseño.
- Documentar, apoyar y evaluar la construcción, comportamiento y desempeño en campo de tramos de prueba con los mismos materiales estabilizados en laboratorio.
- Proponer modificaciones a las especificaciones de materiales estabilizados con cemento conforme con lo establecido en el *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010)*.

Informe LM-PI-UMP-075-P	Setiembre, 2018	Página 5 de 35
-------------------------	-----------------	----------------

## 1.2 Metodología

Para la correcta ejecución del proyecto se propone el esquema experimental mostrado en la siguiente figura (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema metodológico del proyecto

## 1.3 Justificación

La estabilización de bases con cemento ha sido utilizada en otros países con gran éxito ante condiciones de lluvia y humedad extrema, condiciones típicas de muchas regiones presentes en Costa Rica, en donde la época lluviosa abarca más del 50% del año (Orozco, 2007).

El cemento se puede incorporar al material de base para mejorar propiedades como: la resistencia mecánica, la resistencia a las condiciones del clima (especialmente ante altos índices de saturación),

los indicadores de plasticidad o la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados; además de permitir el reciclado de pavimentos existentes severamente deteriorados, así como el uso de materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para base granular. Esto es especialmente importante en zonas donde no se cuenta con buenas fuentes de agregado.

Para su correcta aplicación, se debe determinar en laboratorio la combinación óptima de agregado, agua, cemento y energía de compactación. Los cuatro parámetros son de mucha importancia para garantizar que los costos asociados a la técnica sean mínimos y que se alcance la mejora esperada en cuanto al desempeño de la base estabilizada y del pavimento. Lo anterior también conlleva a una disminución del potencial de agrietamiento y por tanto un incremento en la vida útil de la estructura. No obstante, los procedimientos constructivos y de control de calidad son elementos fundamentales para alcanzar dichos objetivos.

#### 1.4 Grupo investigador

El equipo de investigación responsable de la ejecución del proyecto de investigación se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Responsables del proyecto de investigación

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)
Tania Ávila Esquivel	Maestría	Interino	Investigador principal	5
Wendy Sequeira Rojas	Maestría	Interino	Investigador asociado	5
José Pablo Aguiar Moya	Doctorado	Interino	Investigador asociado	3
Asistente de investigación	Estudiante	Interino	Asistente	5

## 2 FASE I: TRAMOS DE PRUEBA EN CAMPO

### 2.1 Municipalidad de Cartago

En 2015 el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), a través de la Unidad de Materiales y Pavimentos, inicia conversaciones con la Municipalidad de Cartago y la empresa cementera Holcim para analizar la posibilidad de construir un tramo de prueba de base estabilizada con cemento en conjunto. Se decide el siguiente esquema de participación:

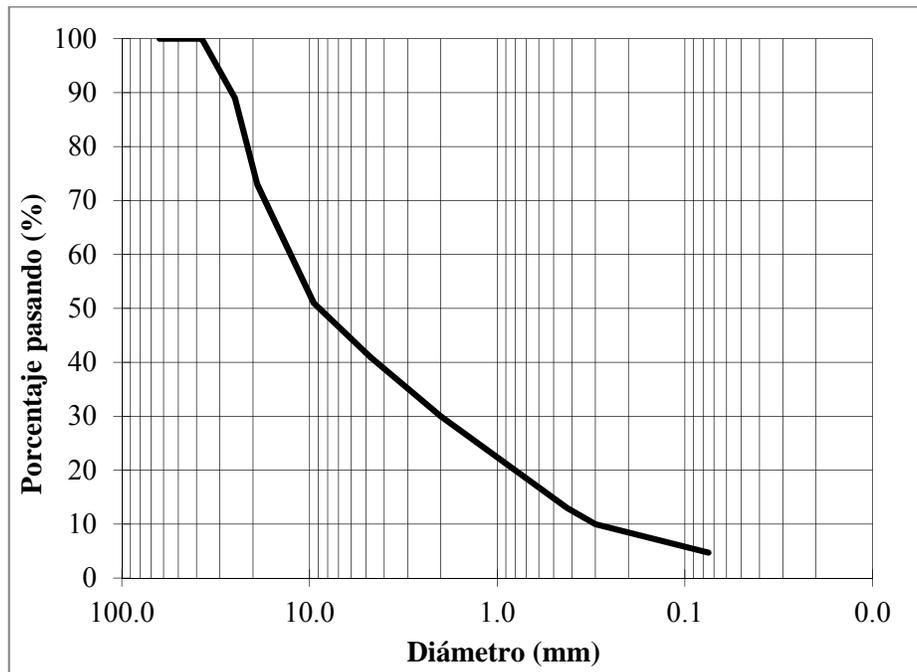
- Municipalidad de Cartago: Se encargará de suministrar el material de base granular, el sitio de obra y el equipo y personal necesario para la construcción.



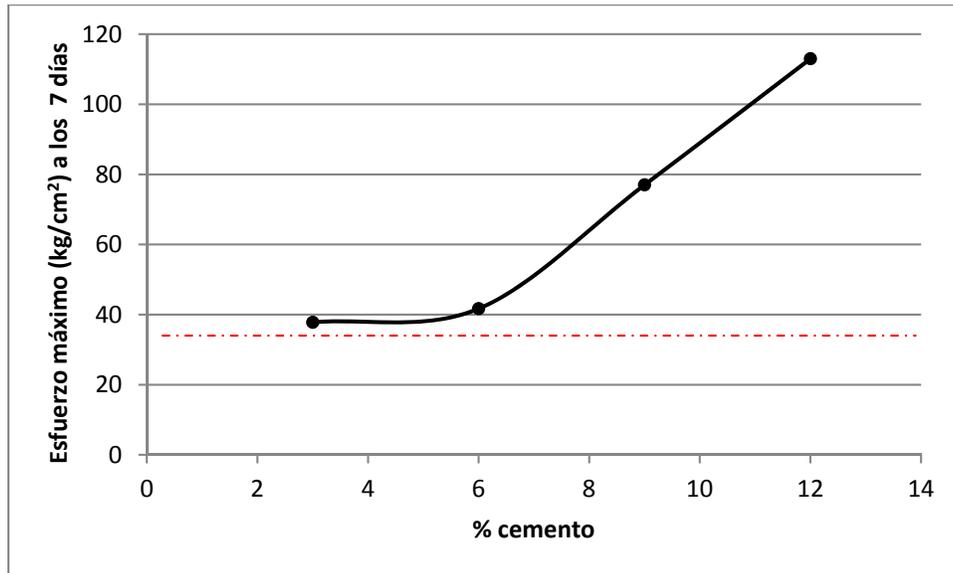


con mejores características. Finalmente, el porcentaje de cemento necesario para alcanzar la resistencia de diseño con este nuevo material corresponde con un 3%.

En la Figura 3 y Figura 4 se muestra la granulometría de la base granular utilizada y el diseño de la BE-25, respectivamente.



**Figura 3.** Granulometría de la base granular



**Figura 4.** Diseño de la BE-25 finalmente colocado

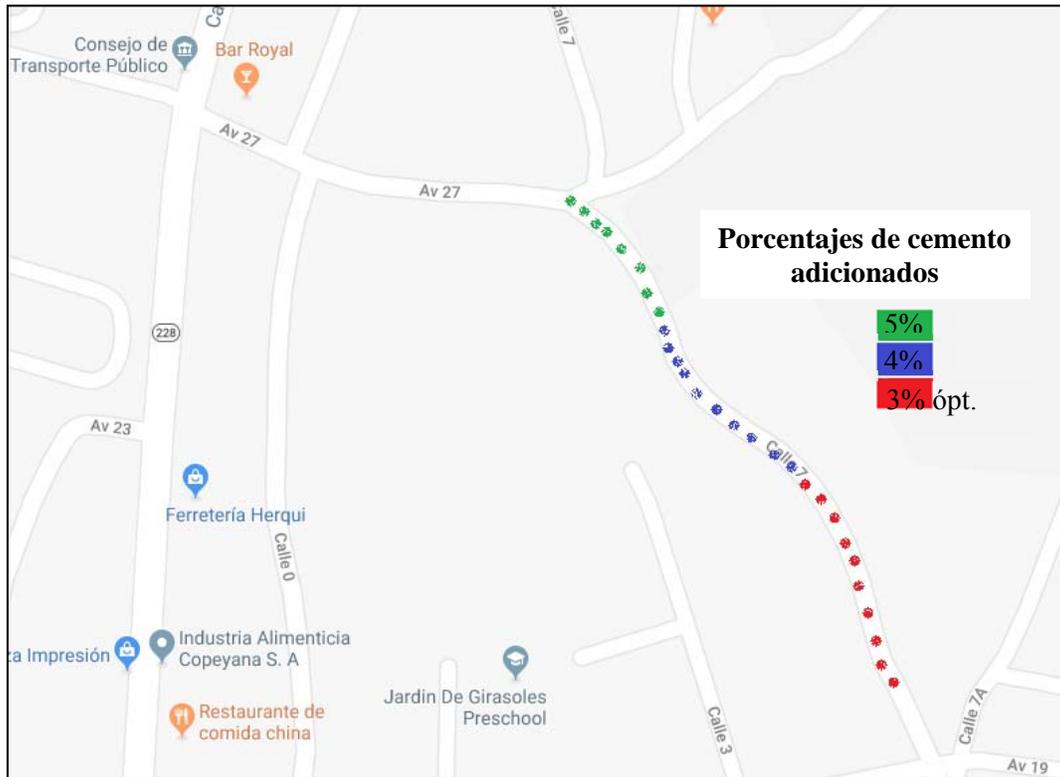
### 2.1.2 Construcción de la base estabilizada

La construcción se realiza entre el 26 y el 28 de enero de 2016. Se decide dividir el tramo en tres secciones utilizando porcentajes de cemento mayores al óptimo, con el fin de medir la variación de la ganancia de resistencia y desempeño de las secciones en el tiempo.

La Figura 5 muestra el arreglo de las secciones en el campo. La Figura 6 muestra imágenes del proceso constructivo.

Debido a la longitud del tramo se decidió realizar la primera y segunda sección (3% y 4%) de 100 m, mientras que la sección correspondiente al 5% quedó de 50 m.

Cuatro meses después de construido el tramo se colocó un tratamiento superficial, la Figura 7 muestra el acabado final.



**Figura 5.** Arreglo de secciones estabilizadas con cemento en el tramo de prueba



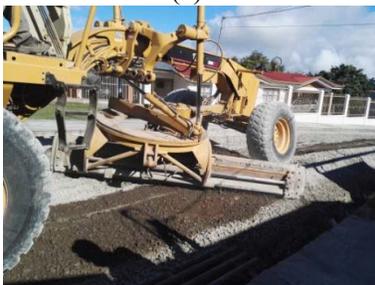
(a)



(b)



(c)



(d)

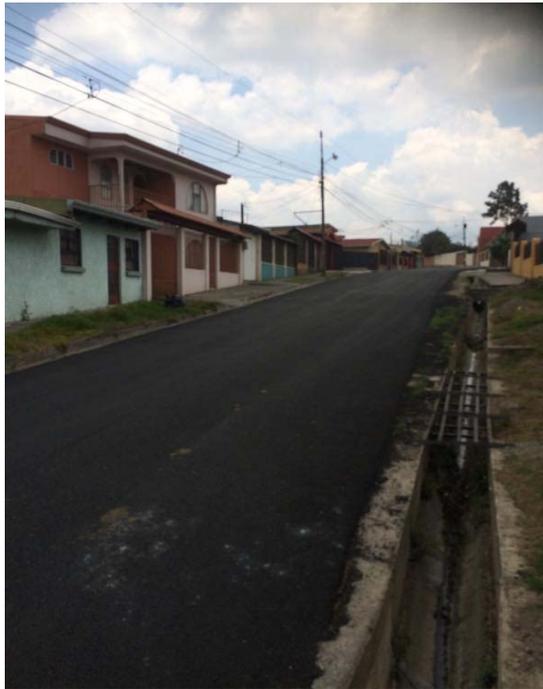


(e)



(f)

**Figura 6.** Imágenes del proceso constructivo



(a)



(b)

**Figura 7.** Tratamiento superficial colocado en el sitio de obra

### 2.1.3 Desempeño del tramo

Inicialmente se tomaron muestras del material estabilizado de cada sección durante la construcción, para realizar probetas en el laboratorio, las cuales se fallaron a los 7 y 28 días. La Tabla 2 y Figura 8 muestran los resultados obtenidos a la compresión confinada.

**Tabla 2.** Datos de falla a la compresión confinada de especímenes muestreados en campo

Porcentaje de cemento adicionado por tramo	Resistencia a la compresión a 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio por tramo (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. Estánd. (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio por tramo (kg/cm <sup>2</sup> )	Desv. Estánd. (kg/cm <sup>2</sup> )
3%	115	99.4	14.86	152	121.3	26.73
	97.8			109		
	85.4			103		
4%	91.3	109.4	17.40	139	145.3	7.09
	111			153		
	126			144		
5%	96.8	90.9	7.31	139	140.3	6.11
	82.7			147		
	93.1			135		

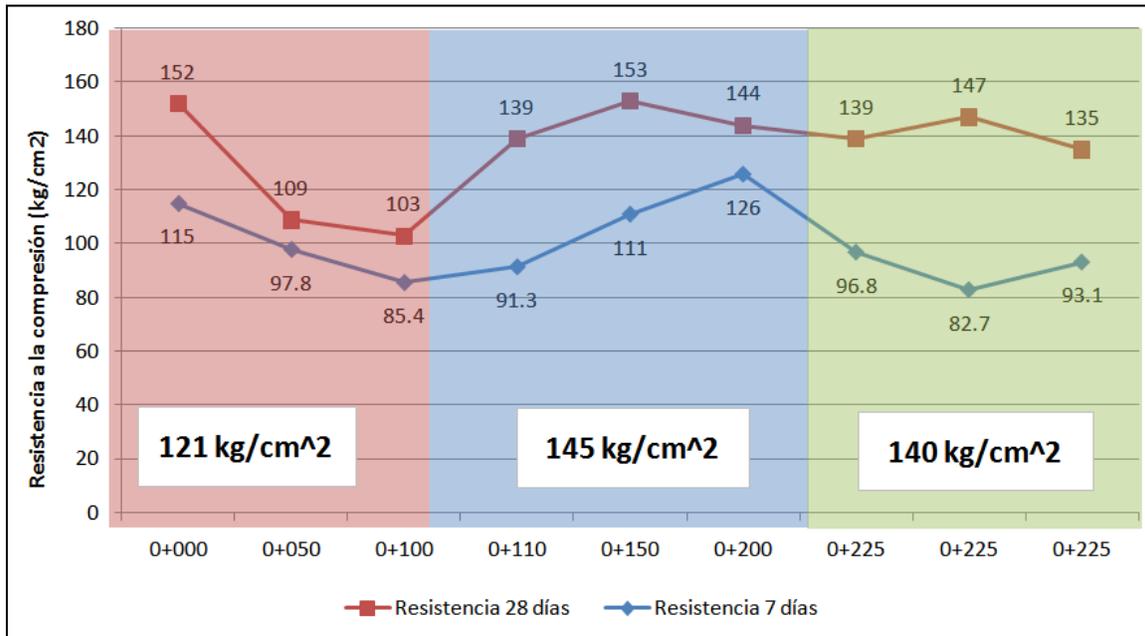


Figura 8. Datos de falla a la compresión inconfiada de especímenes muestreados en campo



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9. Núcleos extraídos en el sitio de obra

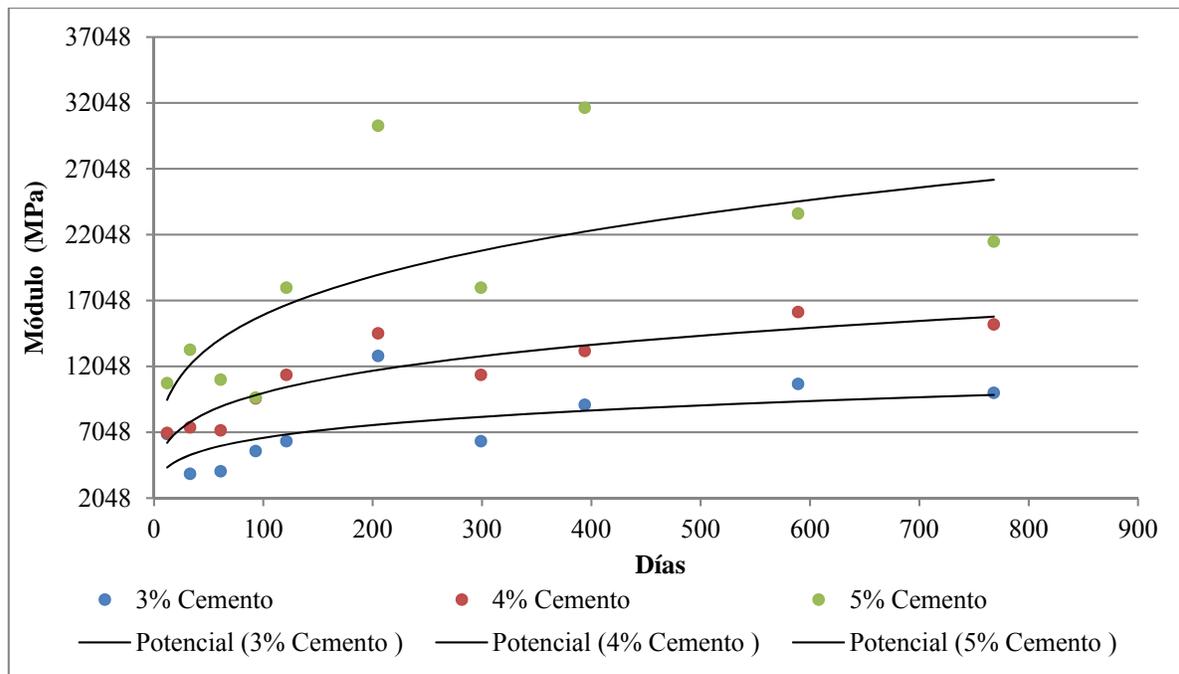


El 21 de abril se realizó una extracción de núcleos con el fin de verificar las resistencias obtenidas en campo, 5 meses luego de construido el tramo se fallaron los núcleos. La Figura 9 y Tabla 3 muestran los especímenes y resultados obtenidos.

**Tabla 3.** Datos de resistencia a la compresión de núcleos extraídos

Porcentaje de cemento adicionado por tramo	Resistencia a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio por tramo (kg/cm <sup>2</sup> )
3%	96	102
	108	
4%	131	136
	141	
5%	149	139
	128	

Finalmente, se realizó el ensayo de deflectometría de impacto (FWD, por sus siglas en inglés). Los resultados del módulo resiliente retrocalculado para las distintas fechas se muestran en la Figura 10.



**Figura 10.** Datos de FWD en tramo estabilizado con cemento de Cartago

## 2.2 *Municipalidad de Mora*

En el 2017 la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR, establece dentro del marco de su convenio, un proyecto con la Municipalidad de Mora. Dicho proyecto busca aplicar distintas técnicas de estabilización en una ruta de prueba para decidir cuál técnica resulta más rentable para el sitio. Dentro de las técnicas aplicadas se realiza una estabilización con cemento MultiBase (Empresa Holcim), el cual busca alcanzar resistencias más bajas a la compresión inconfínada a los 7 días que las logradas con los cementos de uso general.

El esquema de participación se define de la siguiente manera:

- Municipalidad de Mora: Se encargará de suministrar el sitio de obra y el equipo y personal necesario para la construcción.
- Holcim: Se encargará de suministrar el cemento e inspección de la construcción.
- LanammeUCR: Se encargará de realizar los ensayos (control de calidad), evaluación de los materiales y su desempeño durante la construcción y puesta en marcha.

El tramo tiene una longitud de 100 m y está ubicado en el cantón de Mora, distrito de Piedras Negras, según se observa en la Figura 11.

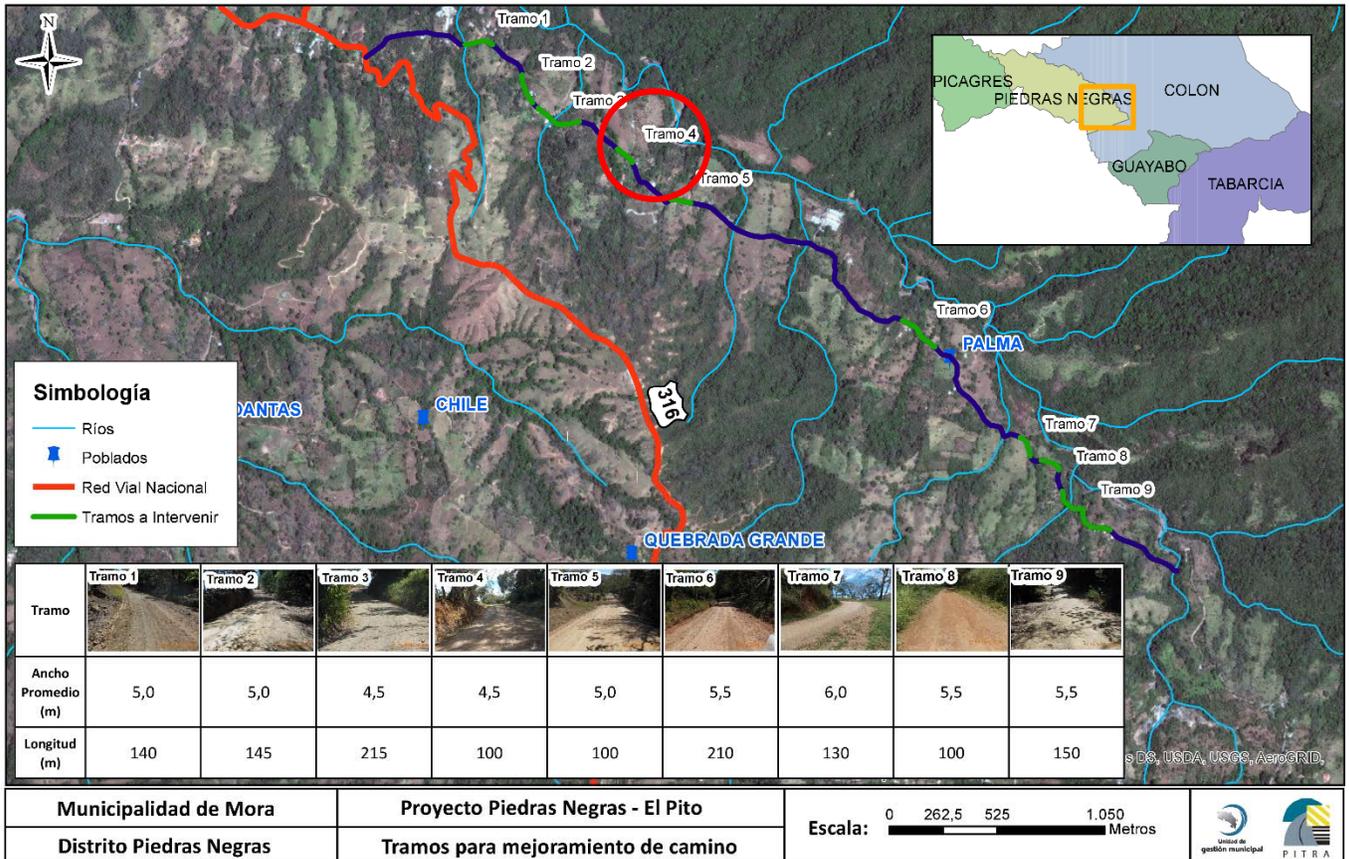


Figura 11. Mapa de ubicación del Tramo estabilizado con cemento (Tramo 4)

### 2.2.1 Diseño de la base estabilizada

El diseño de la base estabilizada de este proyecto lo realizó la empresa CACISA. La dosificación indicada en dicho diseño fue de 1,5 sacos de cemento MultiBase de 50 kg por metro cúbico de material compactado, con el fin de obtener una resistencia a la compresión confinada mínima de 3 MPa (30 kg/cm<sup>2</sup>). La Figura 12 muestra los resultados de resistencia a la compresión a los 7 días de falla mediante los cuales se determinó el contenido de cemento de diseño.

Grafico No.1: Resistencia a la Compresión a los 7 días

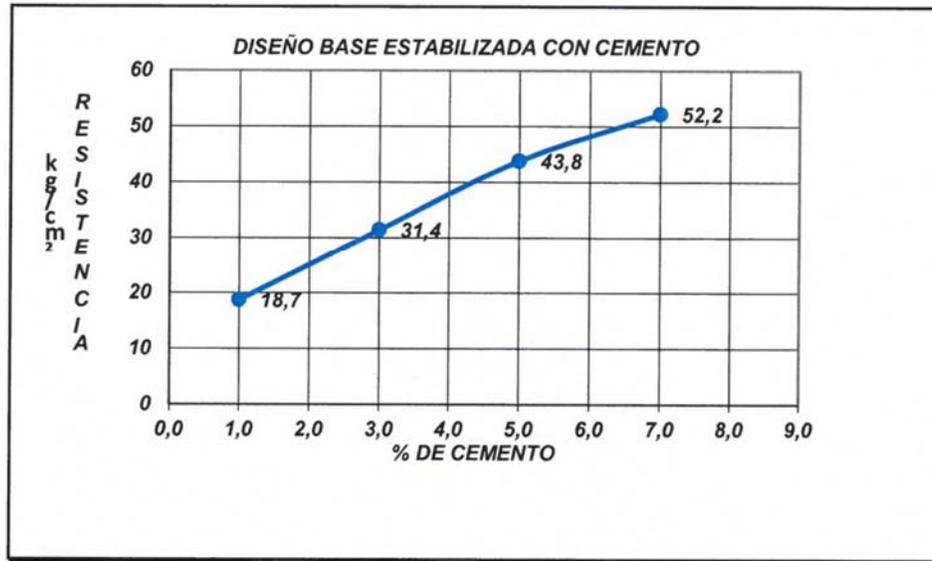
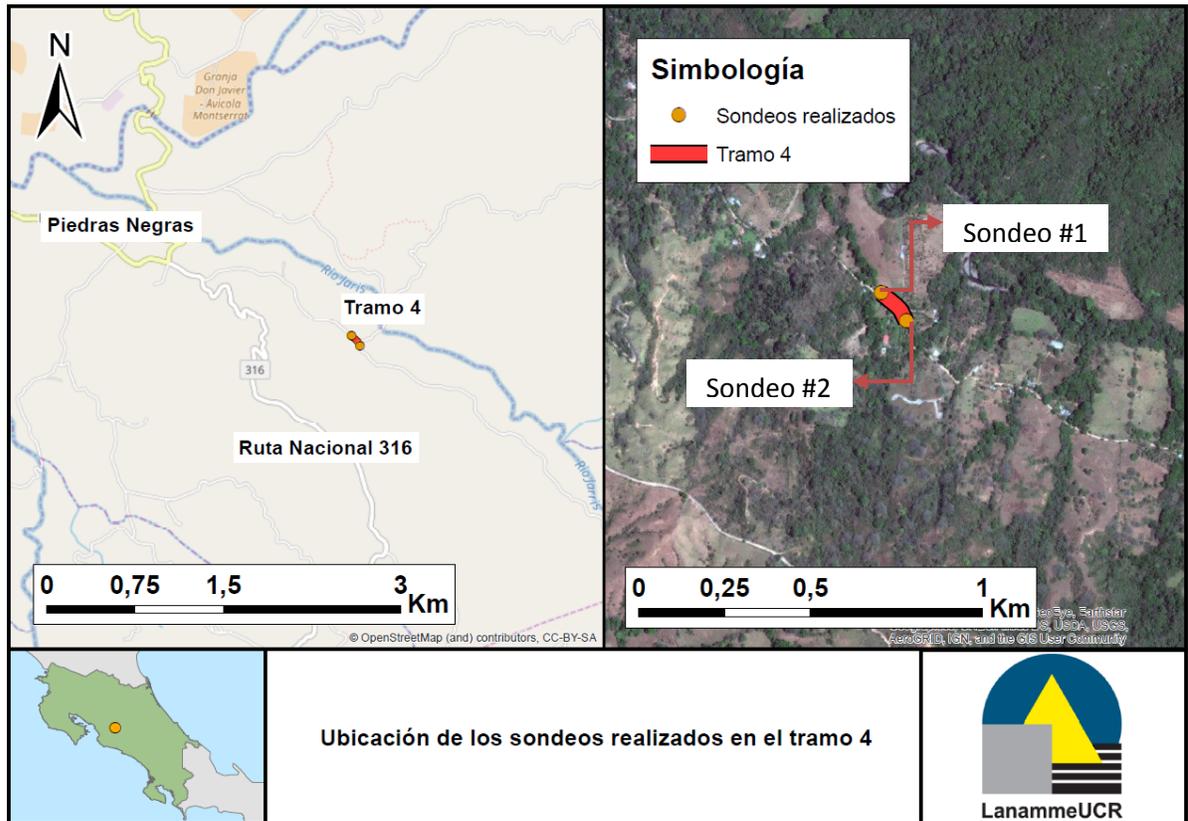


Figura 12. Diseño de base estabilizada. Fuente: Informe 4947-2016 de CACISA

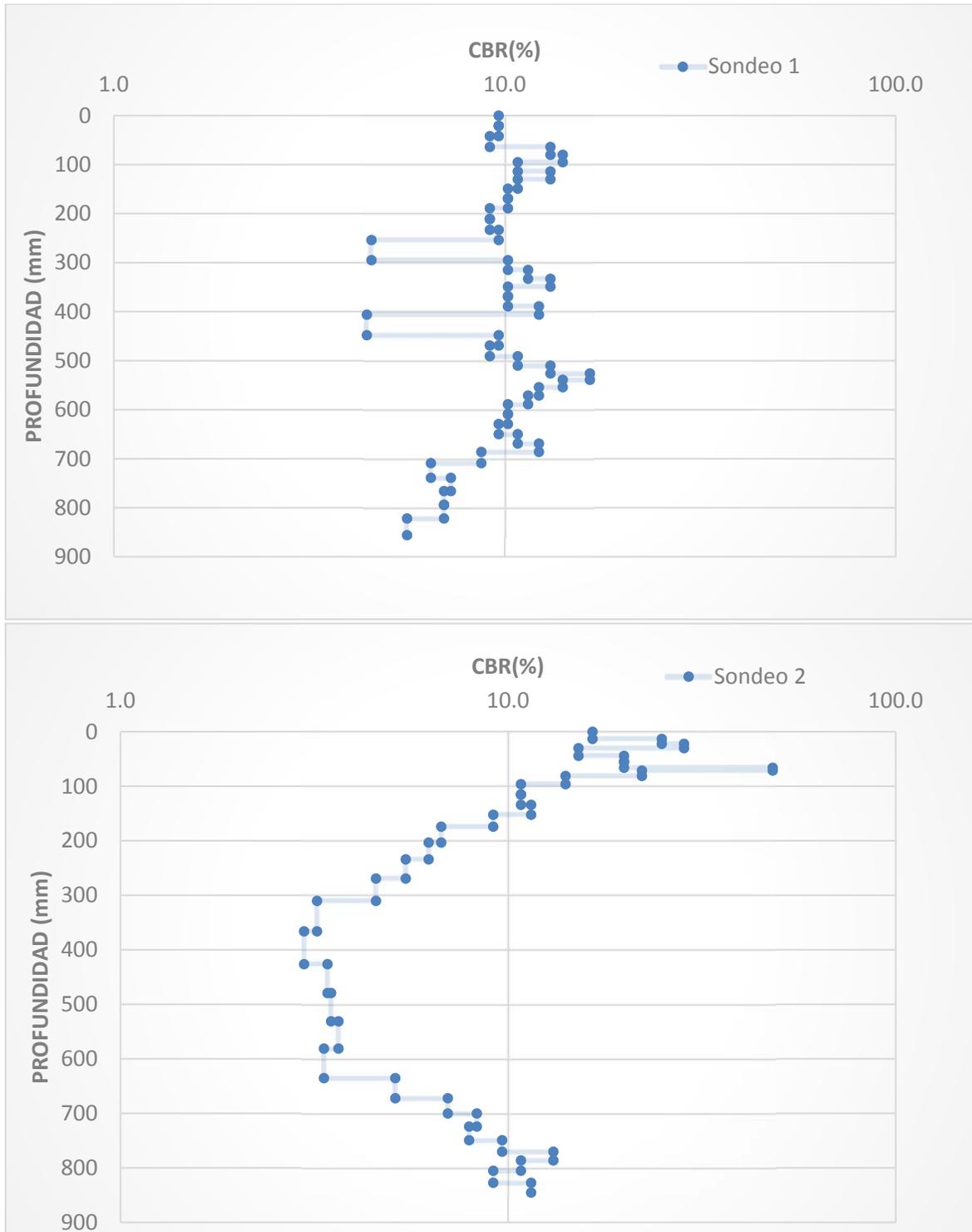
### 2.2.2 Caracterización de los materiales

Se realizaron ensayos para caracterizar la subrasante, así como el material granular con el que se construyó la base estabilizada con cemento.

En el caso de la subrasante, se tiene que es un suelo limoso-arcilloso, color café claro con vetas rojas y amarillentas, muy alterado, con bloques semicompactos y partículas de roca de hasta 12,7 mm de diámetro, con un LL = 61 e IP = 27. Se realizaron dos sondeos con el Cono de Penetración Dinámico (DCP) (Ver Figura 13 y Figura 14). Asimismo, en la Figura 15 se muestra la granulometría del material muestreado.



**Figura 13.** Ubicación de sondeos de DCP realizados en el Tramo 4.



**Figura 14.** Sondeos realizados con el DCP a la Subrasante.

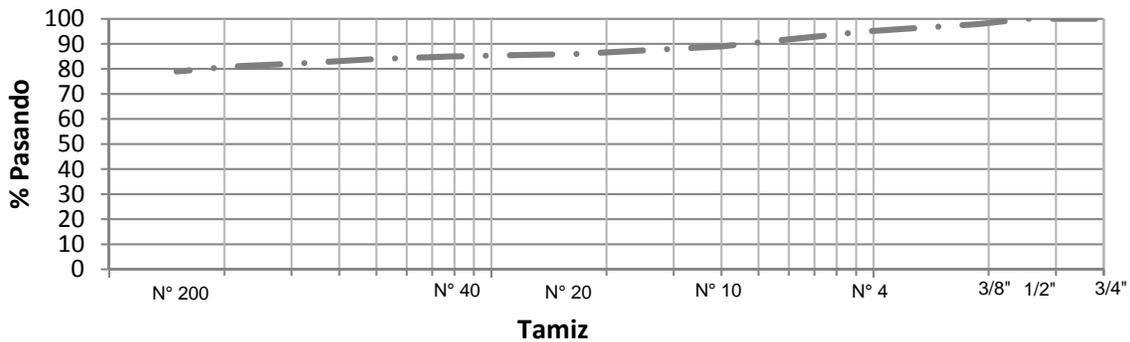


Figura 15. Granulometría de la subrasante. Fuente: Informe I-1341-16 del LanammeUCR

Por otra parte, la caracterización del material granular fue realizada por CACISA. El material presentó un CBR al 95% de compactación de 52 y un LL = NP e IP = NP. La granulometría se puede observar en la Figura 16.

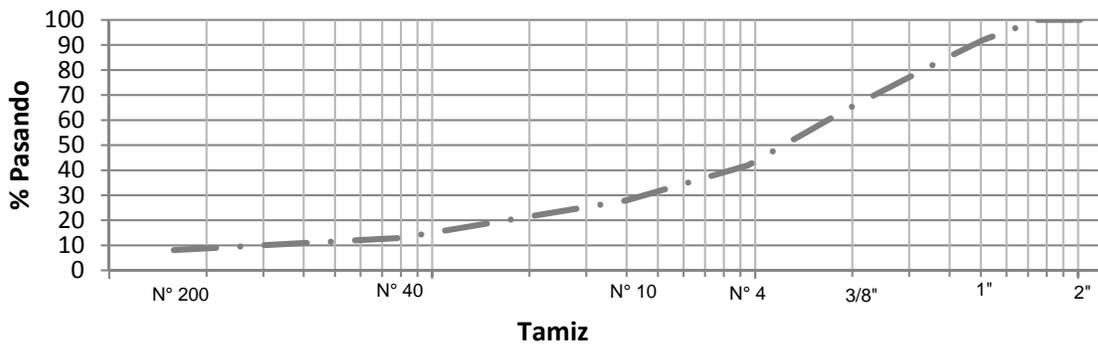
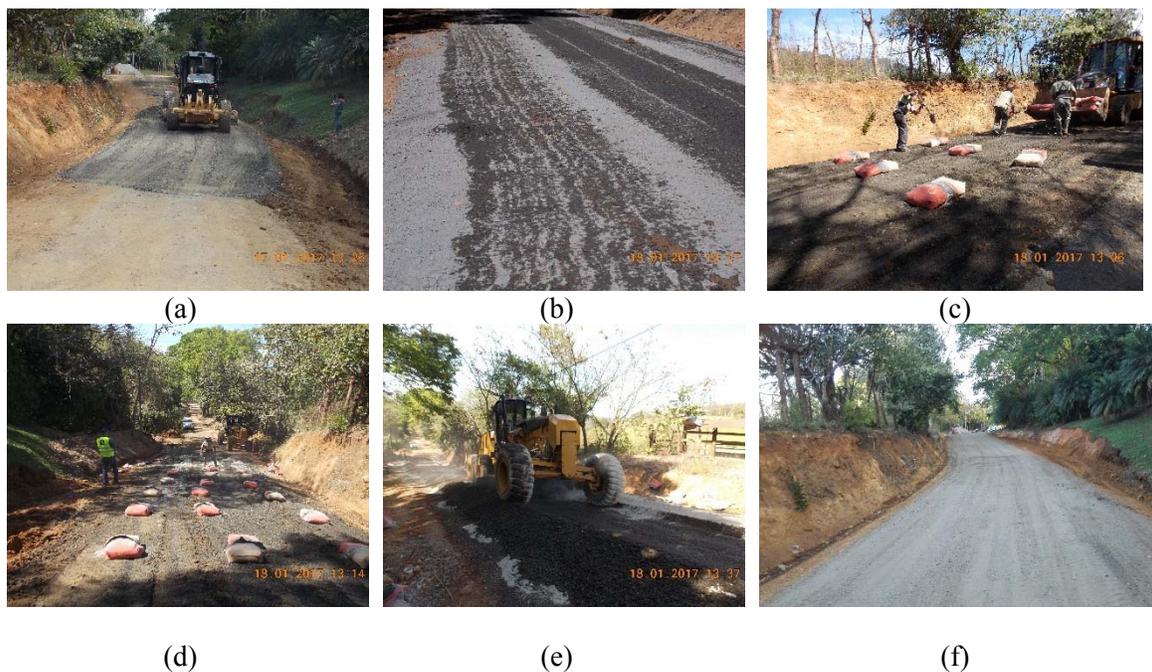


Figura 16. Granulometría de la base granular. Fuente: Informe 4947-2016 de CACISA

### 2.2.3 Construcción de la base estabilizada

La construcción del tramo de prueba se realizó entre el 17 y 18 de enero de 2018. Según la dosificación indicada en el diseño, se utilizaron 122 sacos de cemento de 50 kg distribuidos a lo largo de los 100 m de longitud, para un espesor de 15 cm de material compactado (ancho promedio de 5,4 m). En la Figura 17 se muestra una secuencia del proceso constructivo, así como el acabado final.



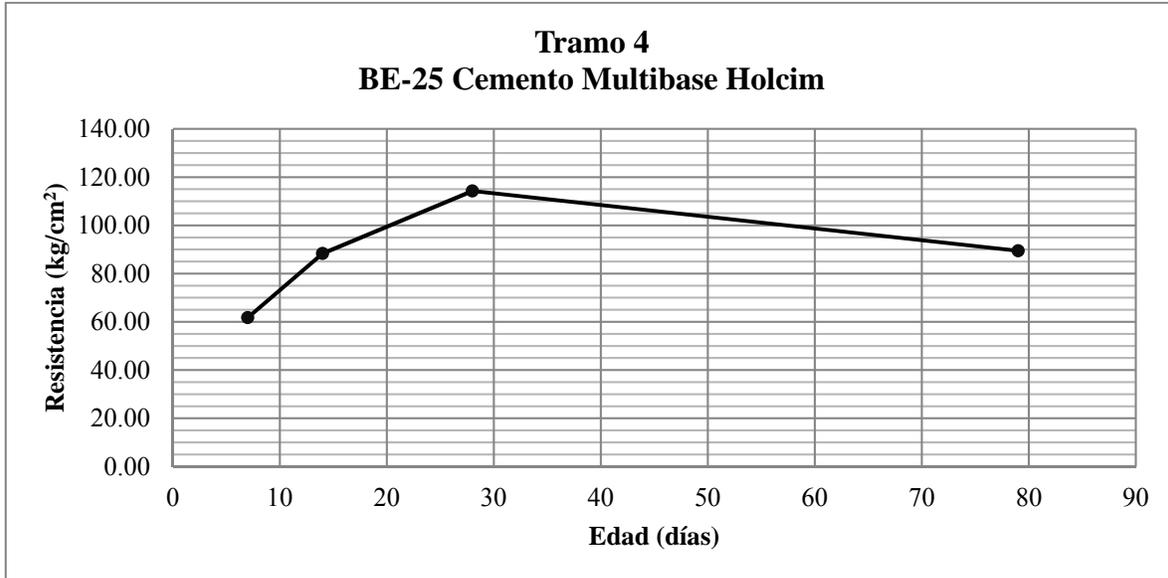
**Figura 17.** Proceso constructivo

## 2.2.4 Desempeño del tramo

Se realizaron probetas con los materiales del sitio de obra los cuales fueron muestreados durante la construcción el 18 de Enero del 2017, dichos especímenes se fallaron a distintas edades. La Tabla 4 y Figura 18 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 4.** Resistencia a la compresión de probetas Tramo de Mora

Estación	Edad a la falla (días)	Resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión Prom. (Kg/cm <sup>2</sup> )
0+025	7	60.72	61.78
0+025		62.85	
0+050	14	88.19	88.36
0+050		88.54	
0+075	28	101.03	114.29
0+075		127.54	
0+100	79	82.84	86.16
0+100		89.49	



**Figura 18.** Datos de falla a la compresión del Tramo de Mora

Se han realizado 3 FWD, para las primeras dos mediciones se utilizó el plato de 150 mm (a 40 kN de carga) y para la tercera medición el plato de 225 mm de radio (85 kN equivalentes a las 40 kN para el radio pequeño). La Figura 19 muestra los puntos de medición seleccionados. La Figura 20 muestra los resultados de módulo resiliente retrocalculado obtenidos.

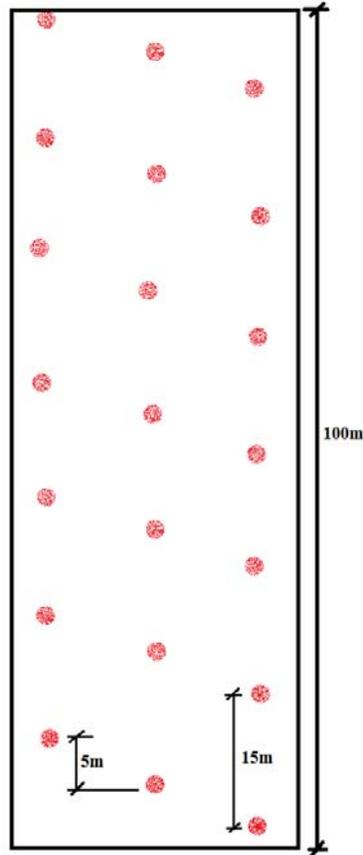


Figura 19. Esquema de mediciones

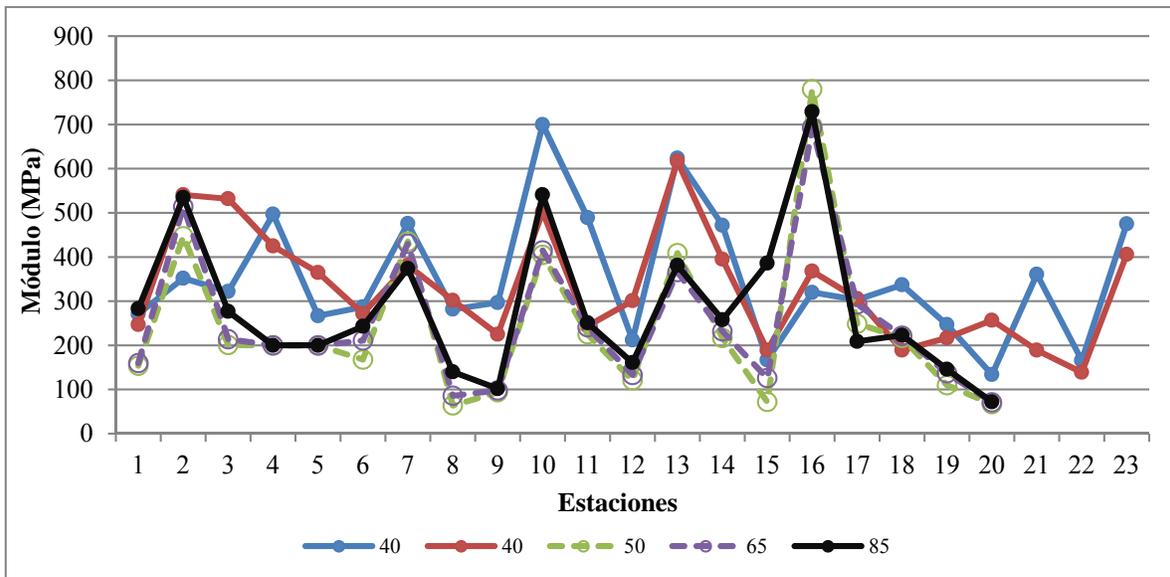


Figura 20. Módulos resilientes retrocalculados del tramo estabilizado con cemento en Mora

### 3 FASE II: ENSAYOS DE LABORATORIO

#### 3.1 Variación de parámetros de diseño

Para esta fase se propuso un esquema experimental, tal que incluyera distintas variables relacionadas con el diseño con el fin de medir la variabilidad en la resistencia de las bases estabilizadas con cemento.

El material granular utilizado fue donado por la compañía PAVICEN y cuenta con las características mostradas en la Tabla 5 y Tabla 6.

**Tabla 5.** Propiedades del material granular

Propiedad	Valor
Límites de Atterberg	No Plástico
Próctor Modificado:	
Densidad seca máxima	1832,5kg/m <sup>3</sup>
Humedad óptima	14,8%
CBR:	
A1 98%	130
A1 95%	70

**Tabla 6.** Granulometría del material granular

Malla	Porcentaje pasando
3/4"	100
3/8"	75
N°4	53
N°10	33
N°40	16
N°50	14
N°200	9

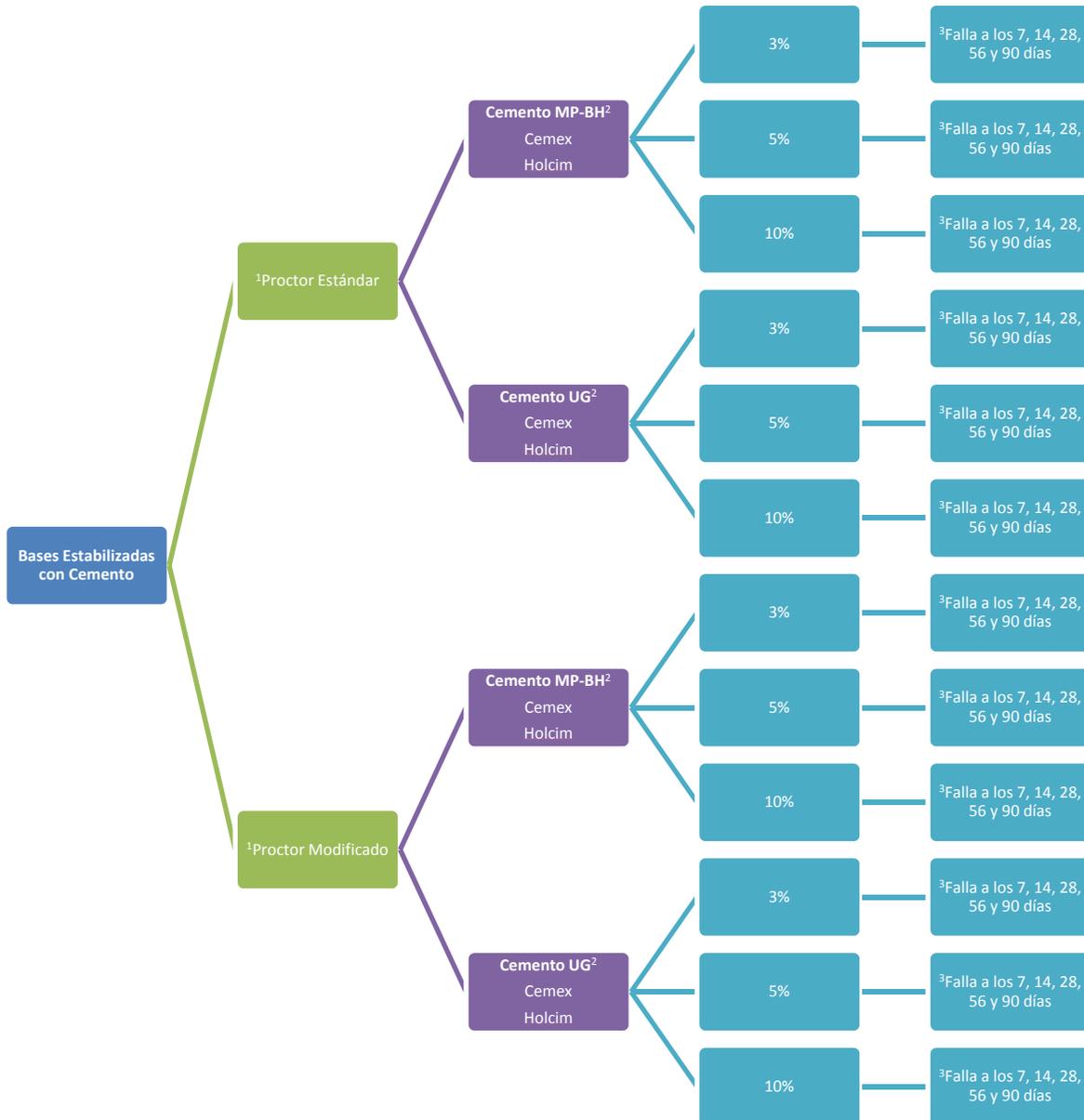
Dentro del esquema experimental de esta fase se variaron los siguientes parámetros:

- Método de compactación (Proctor estándar y Proctor modificado)
- Tipos de cemento (Uso general - UG, bajos calores de hidratación - MP BH)
- Tipo de fuente del cemento (Holcim, Cemex)
- Porcentajes de cemento (3%, 5%, 10%)
- Edades de falla (7,15,28,56,90 días)

La Figura 21 muestra el esquema experimental inicial propuesto. Para todos los casos se utilizó el molde de Próctor de 4" de diámetro.

La Tabla 7 y Figura 22 muestran los resultados obtenidos.

Informe LM-PI-UMP-075-P	Setiembre, 2018	Página 24 de 35
-------------------------	-----------------	-----------------



**Notas:**

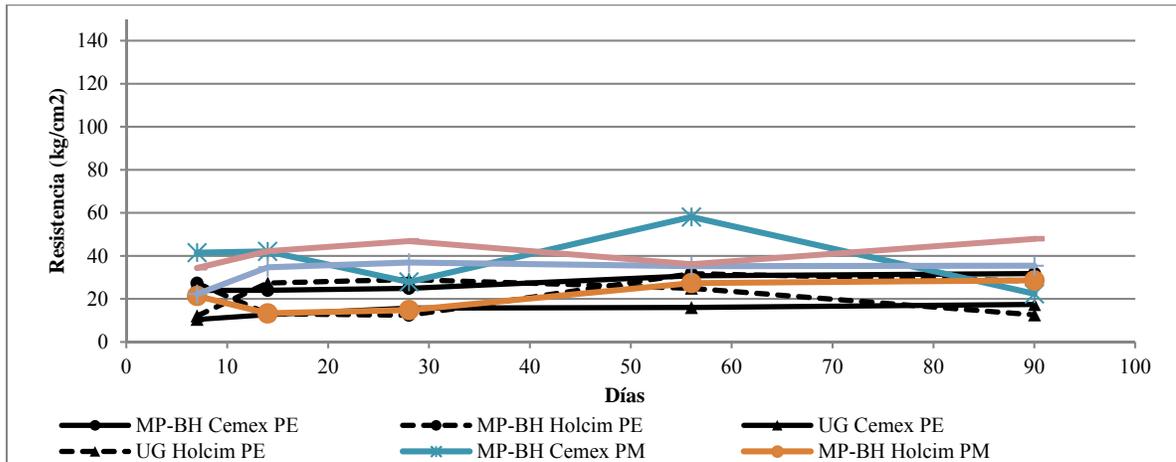
1. Ensayo de Humedad-Densidad para la combinación suelo-cemento de acuerdo a la norma ASTM D558, con la modificación del Proctor
2. Ensayo de compresión inconfiada de acuerdo a ASTM D1633 para las edades de falla solicitadas
3. Tres probetas por edad de falla

**Figura 21.** Esquema experimental para medir la variabilidad en la resistencia de las bases estabilizadas variando los parámetros de diseño

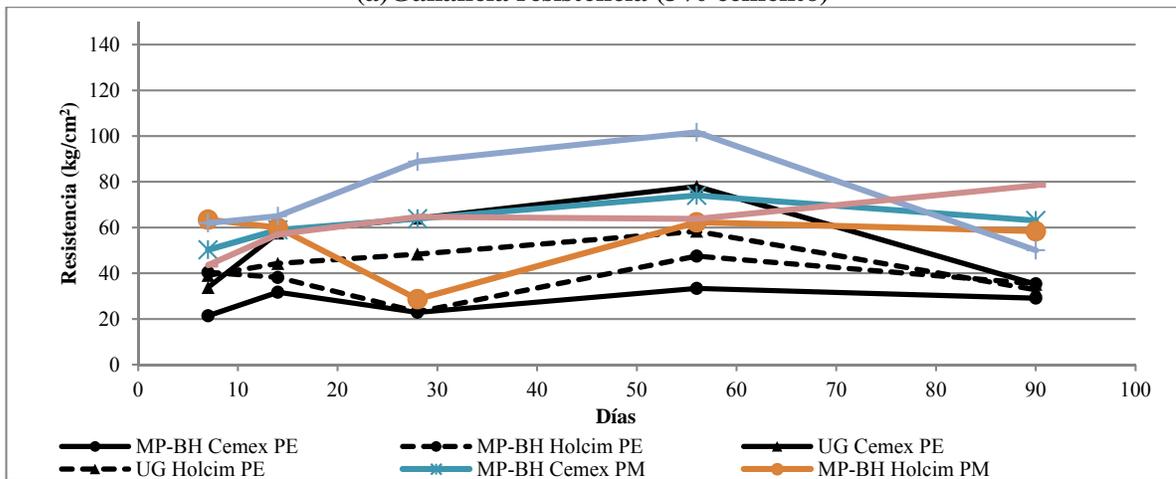


**Tabla 7.** Resultados obtenidos variando los parámetros de diseño de las bases estabilizadas con cemento

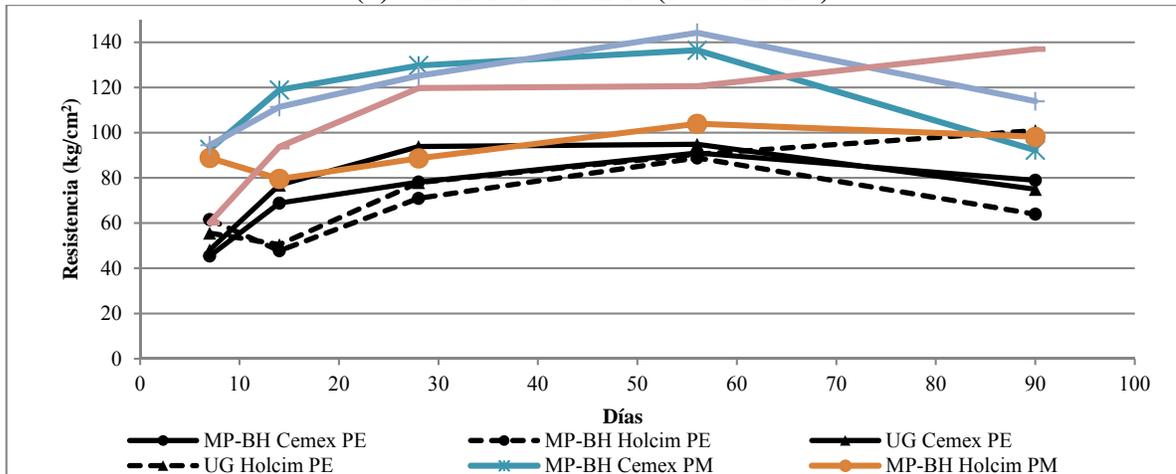
Cemento tipo MP-BH							
Compactación	% cemento	Empresa	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )				
			7	14	28	56	90
Estándar	3	Cemex	23.9	24	24.9	30.7	31.8
		Holcim	27.3	13.1	12.4	31.8	28.4
	5	Cemex	21.4	31.7	22.9	33.4	29.1
		Holcim	40.4	38.2	23.2	47.5	35.4
	10	Cemex	45.5	68.9	78.2	91.1	79
		Holcim	61.6	47.8	71	88.9	64
Modificado	3	Cemex	41.5	42.1	27.9	58.1	22.4
		Holcim	21.4	13.3	14.8	27.4	28.6
	5	Cemex	50.3	59	63.9	74.1	63.1
		Holcim	63.5	60	28.7	62.3	58.4
	10	Cemex	92.7	119	129.8	136.5	92.3
		Holcim	88.9	79.6	88.7	104	98.2
Cemento tipo UG							
Compactación	% cemento	Empresa	Esfuerzo máximo (kgf/cm <sup>2</sup> )				
			7	14	28	56	90
Estándar	3	Cemex	10.5	12.7	15.7	16	17.4
		Holcim	12.1	27.4	29	25	12.6
	5	Cemex	33.8	57.6	64.1	78	35.2
		Holcim	39.1	44.3	48.4	58.4	32.8
	10	Cemex	48.2	76.9	93.9	94.9	75
		Holcim	55.6	50.5	78	90.5	101
Modificado	3	Cemex	22.3	34.7	36.9	35.2	35.4
		Holcim	34.4	42.2	46.9	36.2	47.9
	5	Cemex	62	65	88.9	101.7	50.1
		Holcim	43.6	57.1	64.7	63.8	78.5
	10	Cemex	94.5	111.5	125.3	144.3	114
		Holcim	60.2	93.8	119.8	120.6	137



(a) Ganancia resistencia (3% cemento)



(b) Ganancia resistencia (5% cemento)



(c) Ganancia resistencia (10% cemento)

Figura 22. Resultados obtenidos variando los parámetros de diseño de las bases estabilizadas con cemento



Como se puede observar de la Figura 22 la tendencia de la resistencia decrece a los 90 días para todos los casos, esto se observa como un comportamiento atípico por lo que se solicitó realizar nuevas repeticiones de algunas combinaciones al 5% y 10% de cemento, con el fin de descartar errores en los datos obtenidos.

### 3.1.1 Otros proyectos derivados

Dado que también se ha discutido la idoneidad del tamaño del molde que especifica la norma ASTM D 1633 por ser materiales granulares los utilizados para estabilizar, se decidió complementar el objetivo de esta etapa (3.1 Variación de parámetros de diseño) con ensayos utilizando moldes de 6" de diámetro.

La Figura 23 muestra el esquema experimental propuesto, se plantea la utilización de compactación con proctor estándar (PE) y proctor modificado (PM), utilizando dos diámetros de molde (4" y 6") y dos contenidos de cemento (3% y 5%).

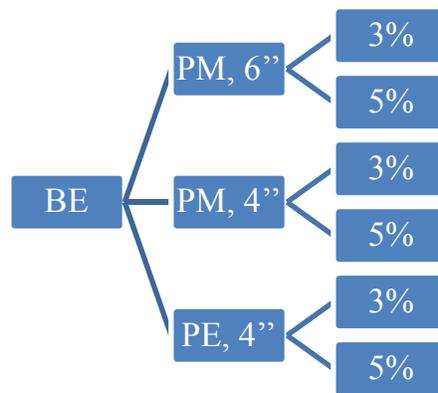


Figura 23. Esquema experimental complementario

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 24 y Figura 25, y en la Tabla 8.

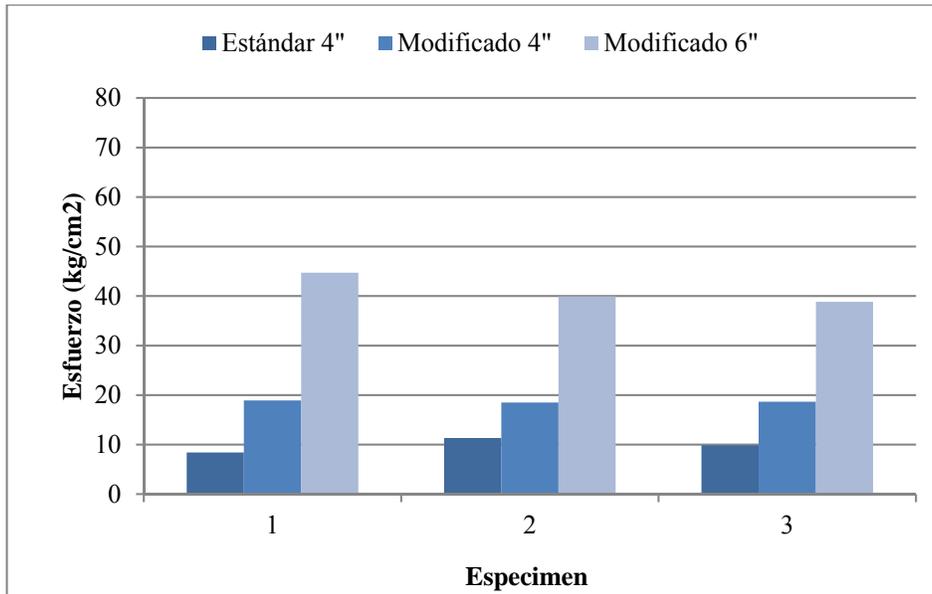


Figura 24. Resistencia a la compresión para un 3% de cemento adicionado.

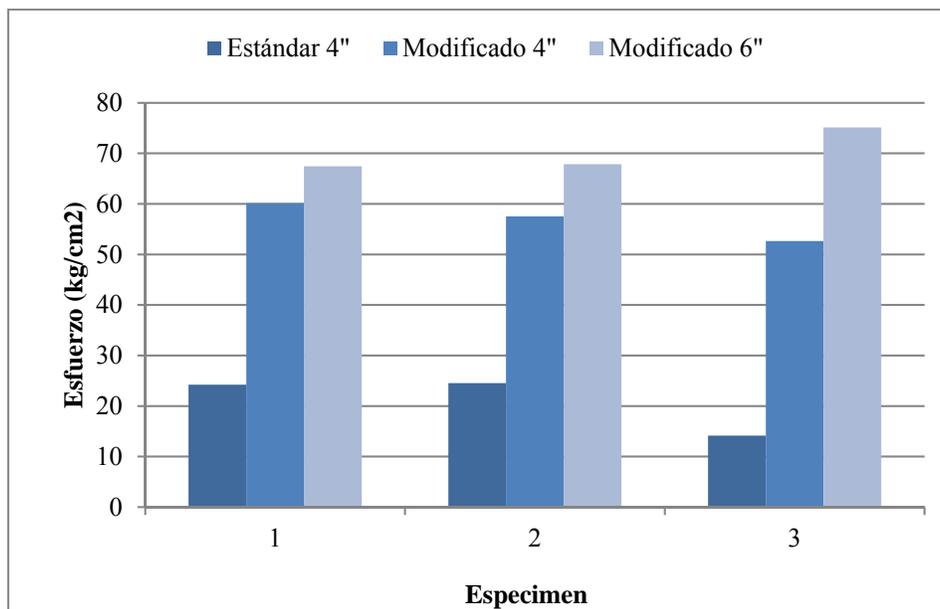


Figura 25. Resistencia a la compresión para un 5% de cemento adicionado.



**Tabla 8.** Comparación porcentual de los resultados obtenidos.

Cemento adicionado	3%	5%	3%	5%	3%	5%
Molde	Esfuerzo promedio a la falla (kg/cm <sup>2</sup> )		% diferencia respecto al Estándar		% diferencia entre modificados	
Estándar 4"	9.87	20.97	-	-	-	-
Modificado 4"	18.69	56.77	47	63	55	19
Modificado 6"	41.16	70.14	76	70		

### 3.2 Vida a la fatiga

A través del proyecto de graduación denominado *Desarrollo de un protocolo de ensayo para estimación de fatiga en una base estabilizada con cemento*, para optar por el grado de Maestría Académica en Ingeniería del Transporte y Vías, realizado por la Ing. Ana Elena Hidalgo (2018); se buscó establecer un protocolo que sirviera como base para obtener la vida a la fatiga de las BE-25.

A continuación, se resume el protocolo descrito por Hidalgo (2018).

#### 3.2.1 Preparación del material granular

1. Preparar el material de base tamizándolo por la malla con abertura de 19 mm (3/4 de pulgada).
2. Preparar 3 baldes de 5 galones con material granular suelto previamente cuarteado.
3. Colocar los tres baldes en la batidora y mezclarlos durante 1 minuto, con el cuidado de redistribuir cualquier acumulación visible de agregado grueso o agregado fino en el volumen.
4. Luego de la mezcla se extrae el material de la batidora con una cuchara metálica de no más de un litro de capacidad, y se va colocando equitativamente en los baldes hasta alcanzar la mitad, punto en el que se toma una muestra de humedad de más de 800 g. Se continúa con el llenado de los baldes hasta que cada uno contenga 28 kg de material.
5. Se sellan con tapa y se almacenan debidamente identificados.
6. La muestra para humedad debe ser pesada, colocada en un horno durante 24 horas y después pesada de nuevo para determinar la humedad natural del material.

#### 3.2.2 Mezclado del material

1. Se seleccionan dos baldes de material, de preferencia consecutivos, se procede a calcular la humedad extra que se requiere para obtener la humedad óptima, según la corroboración de humedad realizada en 3.2.1.

$$W_{agua,extra} = W_{mat} \cdot W_{\acute{o}pt} \cdot \left(1 - \frac{W_{mat}}{W_{\acute{o}pt}}\right) \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde  $W_{mat}$  = humedad actual del material y  $W_{\acute{o}pt}$  = la humedad deseada del material.

2. Prepara el peso de agua y cemento necesario para alcanzar la resistencia a la compresión a analizar.



3. Se humedecen hasta saturación las paredes de la batidora, se lava cualquier material adherido que esté propenso a soltarse.
4. Se agrega el material de dos baldes a la batidora y se distribuye con la batidora girando durante 15 segundos.
5. Con la batidora detenida o girando a unas 12 revoluciones por minuto, se adiciona el cemento tan distribuido como sea posible y evitando de igual manera que se acumulen gruesos o finos.
6. Una vez que se adiciona todo el cemento, se agrega el peso de agua para alcanzar la humedad óptima para compactación.
7. Se procede a mezclar con la batidora a máxima velocidad durante 2 minutos; se deja reposar 2 minutos.
8. Finalmente se mezcla 2 minutos más, evitando la acumulación de finos o gruesos en el material y se procede a moldear el espécimen.

### 3.2.3 Consideraciones sobre el molde y el método de compactación

1. Se utilizaron moldes metálicos de 150 mm de alto con 150 mm de ancho y 535 mm de longitud, que comúnmente son utilizados para elaborar especímenes en concreto.
2. Para moldear adecuadamente los especímenes, se debe aplicar una energía de compactación equivalente a Próctor Modificado, esto se puede lograr mediante ciclos de carga (método de compactación con martillo) o aplicación de carga continua, durante un periodo de tiempo.

### 3.2.4 Moldeo y compactación de especímenes

1. Pesar los moldes vacíos y limpios.
2. Los moldes deben ser ajustados a los collares de compactación, las tuercas de sujeción deben apretarse en cruz, primero manualmente y después con la utilización de una herramienta dos vueltas más, de manera que se evite que la vibración de compactación las desajuste.
3. En todas las caras internas del molde que vayan a estar en contacto con el material, se debe aplicar una capa de aceite que permita un desmoldado de los especímenes sin que se pierda material.
4. Se compacta el material en 6 capas.
5. Se coloca el material de la capa correspondiente, con el cuidado de llenar debidamente todas las esquinas del molde y evitando acumulaciones visibles de material grueso.
6. Se coloca el sistema de compactación sobre la superficie del material y se presiona ligeramente, con el fin de uniformar la superficie.
7. Se enciende el equipo y se procede a compactar durante 2 segundos la superficie, esto para evitar que el material se segregue por el prolongado tiempo de aplicación de energía.
8. Se procede a compactar el material durante 16 segundos continuos.
9. Se apaga el equipo y se procede a romper 6 mm de la superficie del material con un cuchillo, se debe aprovechar este procedimiento para remover cualquier concentración de agregado fino o grueso.
10. Repetir 5, 6, 7 y 8 para la capa 2, 3, 4, y 5. Repetir 5, 6 y 7 para la capa 6.



11. Al colocar el material que llena el molde a la mitad, se extrae de la batidora la muestra para determinar la humedad del material con el que se está moldeando el espécimen.
12. Remover el collar de compactación, para esto se debe cortar el perímetro del collar de compactación con un cuchillo para evitar el daño al espécimen y se retira el molde metálico del soporte del collar.
13. Se procede a rasar el espécimen, con una pletina metálica, se remueve el material sobresaliente sobre la cara superior del molde. Piedras parcialmente sobresalientes, se deben remover.
14. Con una cuchara, extraiga material sobrante de la batidora y sobre el espécimen tamícelo con una malla N° 4, elimine el material sobre el tamaño y distribuya el material tamizado sobre la superficie.
15. Con la pletina metálica, proceda a alinear la superficie superior con el material fino, revisando visualmente la presencia de huecos o zonas donde el material se vea suelto o poco denso.
16. Con la espátula, limpie los bordes (angulares) del molde y termine la operación con una brocha, todo esto sin quitar o agregar material a la superficie.
17. Con el molde totalmente limpio de material que no pertenezca al espécimen, se pesa y se registra el valor.

### 3.2.5 Procedimiento de curado de especímenes

1. Una vez moldeado el espécimen, se almacena en el molde fuera de la luz directa del sol, cubierto por un material no absorbente.
2. Se cura el material con agua sobre la superficie superior (expuesta) durante las primeras 48 horas, alternativamente si el espécimen se va a extraer del molde antes de esos dos días, se debe cubrir con plástico para evitar pérdida de humedad autógena.
3. Después de 48 horas, se preparan dos reglas de 7,5 cm de ancho (mínimo) por 2 cm de alto, cubiertas con papel periódico para colocar los especímenes sin que sean sometidos a esfuerzos relevantes.
4. Se extrae el espécimen del molde, se envuelve o se almacena el espécimen en plástico y después en papel periódico (para aislarlo de cambios de temperatura bruscos) y se coloca sobre las reglas.
5. Por lo menos 48 horas antes del ensayo, se debe trasladar el espécimen a una cámara húmeda para asegurar que, al momento de ensayo, todos los especímenes se encuentren con una humedad interna similar.
6. El espécimen para ensayos de módulo de ruptura debe ser extraído de la cámara húmeda y proceder al ensayo, tan rápido como sea posible.
7. En el caso de los ensayos de vida-fatiga, que se espera tarden más de 30 minutos, el espécimen debe ser envuelto en plástico al sacarlos de la cámara húmeda.

### 3.2.6 Montaje para ensayos con carga en el tercio medio

Es necesario contar con un accesorio para el ensayo de carga en el tercio medio, se busca separar el cabezal de carga del eje de conexión y sustituir las bandas de cuero superiores por un capeo delgado. Para conectar el equipo para ensayo y el cabezal, se debe utilizar el accesorio para ensayos de compresión con cabeza rotatoria, de manera que simplemente se apoya sobre el cabezal; este último debe ser verificado con nivel para asegurar la horizontalidad. En los apoyos inferiores, se deben utilizar las bandas de cuero, ya que el peso propio del espécimen las ajusta y evita concentraciones de esfuerzo, el montaje completo se puede observar en la Figura 26.



**Figura 26.** Montaje final.

Fuente: Alfaro, 2015

### 3.2.7 Modelo matemático para la predicción de la vida a la fatiga

Además del protocolo, Hidalgo (2018) propone el siguiente modelo matemático para predecir la vida a fatiga de las bases estabilizadas con cemento.

$$\log(N) = 1,60 - 9,39 \cdot \log(SR) \quad \text{Ecu. 2}$$

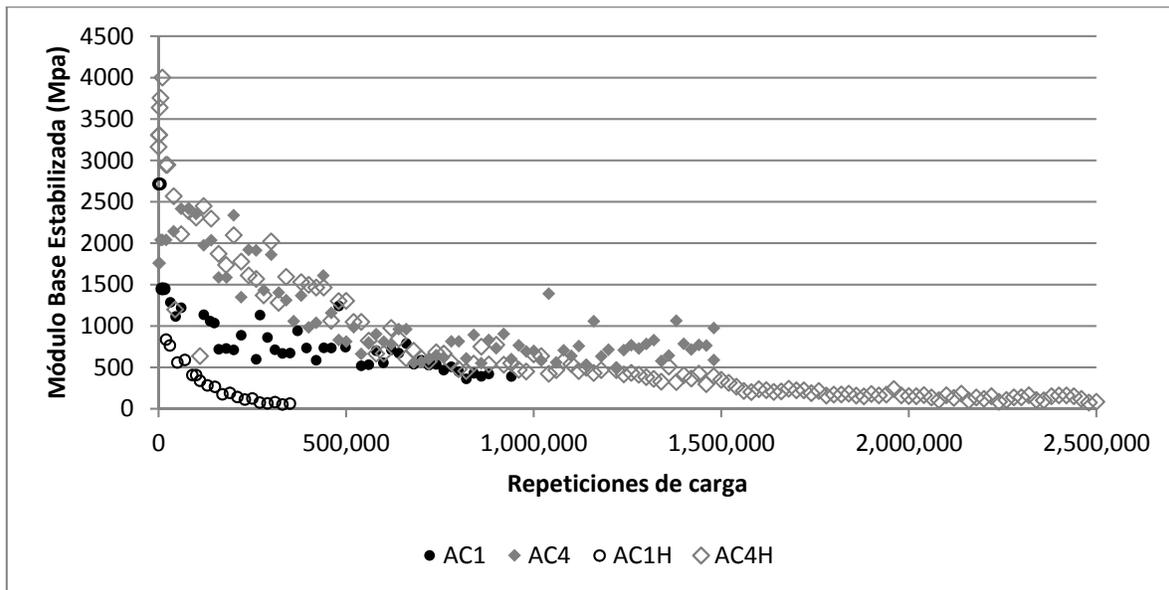
Donde  $N$  = Número de repeticiones de carga,  $SR$  = Relación de esfuerzos,  $SR = \sigma_t / MR$ ,  $\sigma_t$  = Esfuerzo de tensión máximo producido en la parte inferior de la BE (psi) y  $MR$  = Módulo de Ruptura (Resistencia a Flexión) a 28 días (psi).



### 3.3 Ensayo a escala natural

A la fecha se han fallado 4 secciones de carretera a escala real con la utilización de un simulador de vehículos pesados, como parte del proyecto PaveLab (UMP, 2015; 2016; 2017). La Figura 27 muestra los datos de módulo retrocalculados para la base estabilizada presente en 4 tramos de los 8 ensayados.

Los tramos AC1 y AC4 fueron fallados con la humedad óptima de diseño de la base estabilizada que corresponde con un 11.5% para ambos casos. Los tramos AC1H y AC4H fueron fallados con humedades de 45% y 49%, respectivamente, que se alcanzaron al inundar las capas inferiores.



**Figura 27.** Datos de módulo resiliente retrocalculado con respecto al número de aplicaciones de carga a la falla.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Consejo nacional de vialidad (CONAVI). 2017. *DE-664-2016 Informe presupuesto ordinario 2017*. Secretaría técnica de la autoridad presupuestaria. Ministerio de Hacienda. San José, Costa Rica.

Alfaro, J. 2015. *Análisis experimental de las variables mecánicas que definen el comportamiento de las bases estabilizadas para carreteras ante cargas de fatiga*. Proyecto de graduación para optar por el grado y título de Licenciado en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

- Hidalgo, A. E. 2018. *Desarrollo de un protocolo de ensayo para estimación de fatiga en una base estabilizada con cemento*. Proyecto de graduación para optar por el grado y título de Maestría Académica en Ingeniería del Transporte y Vías. Sistema de Estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). 2010. *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR 2010*. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). 2017. *Informe Anual*. MOPT-01-13-01-01-2017. San José, Costa Rica.
- Orozco, E. 2007. *Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de Infraestructura Vial*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Unidad de Materiales y Pavimentos. 2015. *Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural: LM-PI-UMP-028-R1 Informe de avance*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Unidad de Materiales y Pavimentos. 2015. *Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural: LM-PI-UMP-053-R1 Informe de avance*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Unidad de Materiales y Pavimentos. 2015. *Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural: LM-PI-UMP-054-R1 Informe de avance*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Unidad de Materiales y Pavimentos. 2016. *Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural: LM-PI-UMP-043-R2 Informe de avance*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Unidad de Materiales y Pavimentos. 2017. *Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural: LM-PI-UMP-043-R3 Informe de avance*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.
- Unidad de Materiales y Pavimentos. 2017. *Primer ensayo acelerado de pavimentos a escala natural: LM-PI-UMP-074-R1 Informe de avance*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.