



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE



Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

PROPUESTA: LM-PI-UMP-011-P

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO EN TRAMOS DE PRUEBA

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Diciembre, 2013

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 47 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.
Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



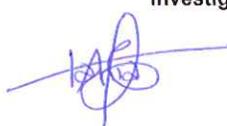
1. Propuesta LM-PI-UMP-011-P		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO-TRAMOS DE PRUEBA		4. Fecha de la Propuesta Diciembre, 2013
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <p><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></p> <p><i>Con el presente estudio se busca verificar y monitorear las mejoras en el desempeño de campo de estos materiales mediante la construcción de tramos de prueba reales, utilizando las técnicas de construcción típicamente utilizadas. Una vez construidos estos tramos, se evaluará en distintos momentos durante la vida útil la evolución del desempeño de los mismos, con el objetivo de verificar si la técnica representa una solución competitiva, económica y ambientalmente amistosa que ofrezca una mejor superficie de ruedo y mejor desempeño ante condiciones de lluvia y humedad.</i></p>		
10. Palabras clave Cemento; Estabilización; Capacidad mecánica	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 23
13. Preparado por: Ing. Gustavo Badilla Vargas Investigador  Fecha: 20/12/13	Ing. Tania Ávila Esquivel Investigadora  Fecha: 20/12/13	Fecha: / /
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 20/12/13	Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc. Auditora Técnica. Unidad de Auditoría Técnica  Fecha: 20/12/13	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: / /

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
VALORAR EL EFECTO DEL CEMENTO COMO ADITIVO ESTABILIZADOR EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE MATERIALES GRANULARES PARA SER UTILIZADO COMO BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO.	5
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.3 ANTECEDENTES	6
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.5 MARCO TEÓRICO	7
1.5.1 FACTORES QUE SE DEBEN CONSIDERAR	7
1.5.2 PROPIEDADES REQUERIDAS DE UN SUELO PARA SER ESTABILIZADO CON CEMENTO	8
2. METODOLOGÍA PROPUESTA	11
2.1 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (MATERIAL DE BASE Y CEMENTO)	11
2.3 ESTABILIZACIÓN DEL SUELO CON LA INCORPORACIÓN DEL CEMENTO	12
2.4 CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN EN CAMPO DE TRAMOS ESTABILIZADOS CON CAL.....	14
2.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS, HALLAZGOS Y OBSERVACIONES	17
2.6 ELABORACIÓN DE INFORMES, PUBLICACIONES, MANUALES Y PRODUCTOS.....	17
3. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS.....	17
4. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN.....	18
5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	19
6. RECURSOS NECESARIOS	20
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PARA LA SELECCIÓN DE LOS ADITIVOS	9
FIGURA 2. ESQUEMA EXPERIMENTAL	16

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MATRIZ PARA LA SELECCIÓN DEL ADITIVO ESTABILIZADOR	10
TABLA 2. RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	18
TABLA 3. ADMINISTRACIÓN, TRANSPORTE DE MATERIALES Y PONENCIAS (US\$)	20
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE CAMPO/LABORATORIO A REALIZAR	21

1. INTRODUCCIÓN

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 teoría, se logra la estabilización de un material cuando al adicionar el cemento, el agua y la energía de compactación sobre el material, aumentan sus propiedades de resistencia mecánica, de plasticidad y estabilidad ante los procesos de meteorización bajo las condiciones climáticas a la que está expuesto el pavimento.

De lograr esta técnica aumentar la vida útil de los pavimentos, se disminuiría la frecuencia en el mantenimiento de la estructura. Por tanto, al analizar las consecuencias a mediano y largo plazo, resultaría en una solución competitiva económicamente, además de proveer mejoras en las condiciones de ruedo y en el desempeño y durabilidad de la estructura.

1.1 Objetivo general

Valorar el efecto del cemento como aditivo estabilizador en las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales granulares para ser utilizados como base estabilizada con cemento.

1.2 Objetivos específicos

- Verificar el cumplimiento de las propiedades del material de base granular existente para la aplicación de técnicas y métodos de estabilización con cemento.
- Evaluar las variaciones en laboratorio del comportamiento y propiedades físico-mecánicas de materiales estabilizados con cemento.
- Documentar, apoyar y evaluar la construcción, comportamiento y desempeño en campo de tramos de prueba con los mismos materiales estabilizados en laboratorio.
- Verificar el cumplimiento de las especificaciones de materiales estabilizados con cemento conforme a lo establecido en el "Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010"

1.3 Antecedentes

Como antecedente a este proyecto durante el año 2008 se genera por parte de la Unidad de Investigación en Infraestructura Vial del LanammeUCR, un proyecto de investigación enfocado en recopilar información y experiencias en el tema de la estabilización y mejoramiento de rutas no pavimentadas, teniendo como producto la “Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas” (Elizondo y Sibaja, 2008). Así mismo durante el año 2009 se desarrolló el proyecto denominado “Implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño de materiales estabilizados con cal” (Elizondo, 2009) .

En el año 2010 el LanammeUCR llevó a cabo el proyecto de investigación “Implementación de la metodología de diseño para materiales tratados con cal en la construcción y evaluación del desempeño de tramos de prueba en un proyecto en ejecución” (Badilla y Molina, 2010). En dicho informe se presentan los resultados de laboratorio realizados en materiales estabilizados con cal, tales como: resistencia a la compresión inconfiada, CBR y módulo resiliente. Con esto se buscó evaluar la factibilidad de construir tramos de prueba en el proyecto Sifón - La Abundancia. Sin embargo, debido a factores fuera del control del LanammeUCR y de la empresa constructora a la que se adjudicó el proyecto Sifón – La Abundancia, no fue posible llevar a cabo la construcción y monitoreo de estos tramos.

Más recientemente, en el 2012 el LanammeUCR en colaboración con las Municipalidades de Cañas y Cartago, construyó tramos de prueba de materiales estabilizados con cal. Estos tramos se encuentran actualmente dentro de un programa de monitoreo y seguimiento del desempeño y comportamiento del material estabilizado. Este hecho constituye un precedente importante, donde las experiencias obtenidas durante la construcción y monitoreo, así como la experiencia que se tiene a nivel nacional con la técnica de estabilización con cemento, permiten establecer un marco de referencia general para el diseño y construcción de tramos experimentales.

1.4 Justificación

La estabilización de bases con cemento ha sido utilizada en otros países con gran éxito ante condiciones de lluvia y humedad extrema, condiciones característica 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.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Factores que se deben considerar (DOD, 1994)

Los factores que deben de ser considerados en la selección del cemento como estabilizador adecuado para un material de bases son: el tipo de base a estabilizar, el propósito para el cual la capa será utilizada, el tipo de mejora que se desea (objetivo de la estabilización), la resistencia requerida y durabilidad de la capa estabilizada, las condiciones ambientales y el costo.

Existen algunas consideraciones generales que permiten seleccionar al cemento como el estabilizador más apto, tales como la granulometría y la plasticidad. En la práctica es común la utilización de pequeñas cantidades de cemento Portland para aumentar resistencia.

1.5.2 Propiedades requeridas de un suelo para ser estabilizado con cemento (DOD, 1994)

Como procedimiento general se incluyen en este apartado una metodología para seleccionar aditivos aptos para estabilizar un suelo con propiedades específicas, incluyendo los suelos recomendados para ser estabilizados con cemento. En la **Figura 1** se define un área basada en las características granulométricas del material, específicamente en el tamaño de las partículas y porcentajes retenidos en ciertas mallas (Nº4 y Nº200) y los límites de Atterberg del material a estabilizar. Este diagrama es dividido en varias áreas de suelos (1A, 2A, 3, etc.) con tamaños de partículas similares y características de pulverización.

El proceso de selección continúa con la **Tabla 1**, en la cual se especifican para cada área de materiales mostrados en la **Figura 1**, opciones de aditivos y restricciones basados en el tamaño de partícula o el índice de plasticidad (IP). Además en la segunda columna de esta tabla se muestra una lista con los tipos de materiales (SUCS) que entrarían dentro de esta categoría, esta caracterización se utilizaría para comprobar que el área fue seleccionada correctamente.

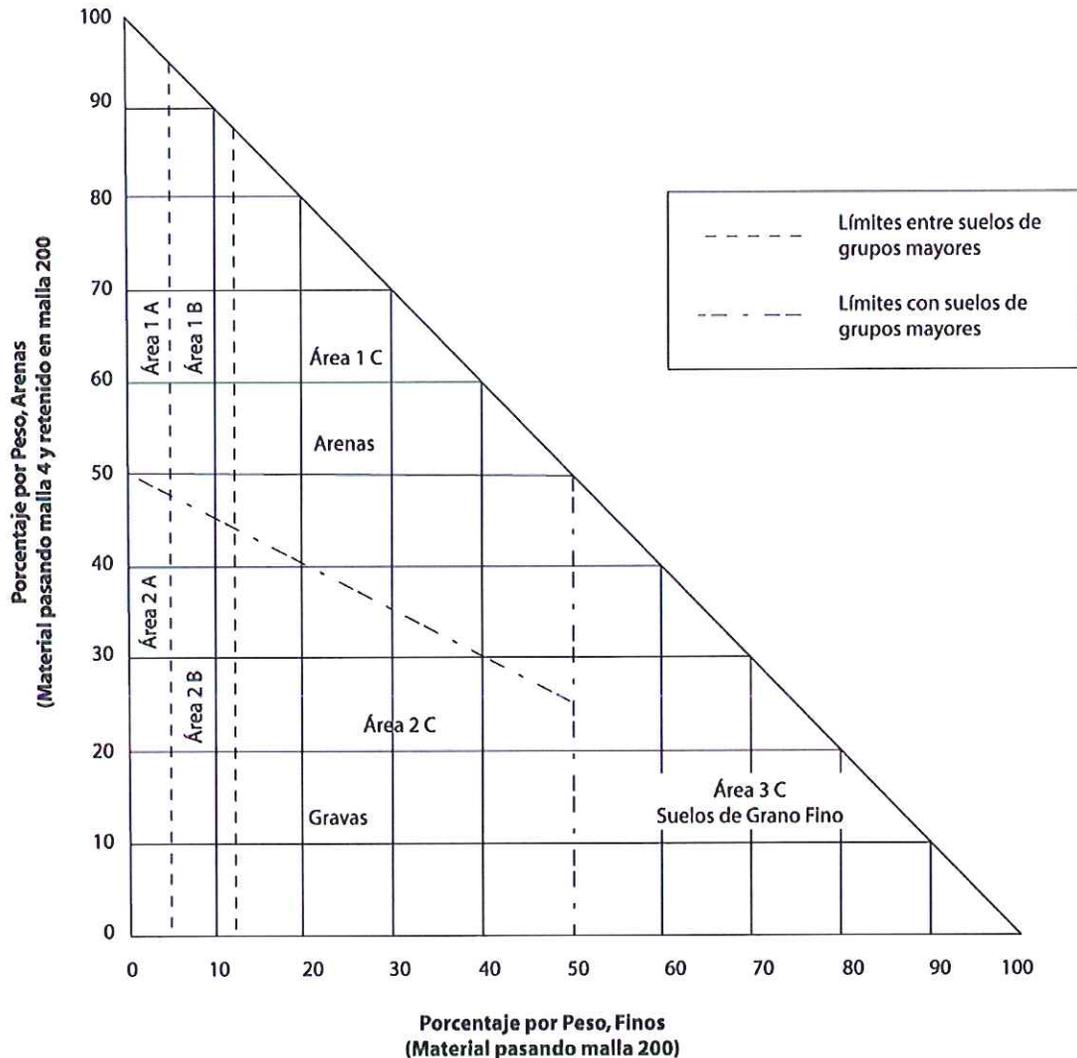


Figura 1. Identificación de áreas para la selección de los aditivos

Fuente: DOD, 1994

Con base en el área identificada según la **Figura 1**, se selecciona la categoría correspondiente en la **Tabla 1** y con esta el tipo de material que se espera sea apropiado para estabilizar el suelo. De la misma forma, se presentan las limitaciones para el uso de los distintos tipos de aditivo. Las limitaciones buscan prevenir el uso de algunos aditivos estabilizadores bajo condiciones particulares del material, para las cuales no son aplicables o la experiencia indica que no brindan beneficio alguno.

Tabla 1. Matriz para la selección del aditivo estabilizador

Área	Clase de Suelo	Tipo de estabilizador Aditivo recomendado	Restricción de LL E IP del suelo	Restricción en porcentaje pasando la malla No. 200	Comentarios
1A	SW ó SP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 25		
1B	SW-SM ó SP-SM ó SW-SC ó SP-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 30 IP no exceda a 12 IP no exceda a 25		
1C	SM ó SC Ó SM-SC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no menor de 12 IP no exceda a 25	No exceda 30% por peso	
2A	GW ó GP	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 25		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% por peso del material pasando la malla No. 4
2B	GW-GM ó GP-GM ó GW-GC ó GP-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no exceda a 30 IP no menor de 12 IP no exceda a 25		Material bien graduado. Debe contener al menos 45% por peso del material pasando la malla No. 4
2C	GM ó GC Ó GM-GC	(1) Bituminosos (2) Cemento Portland (3) Cal (4) Cal-cemento-ceniza volante	IP no exceda a 10 IP no menor de 12 IP no exceda a 25	No exceda 30% por peso	Material bien graduado solamente
3C	CH ó CL Ó MH ó ML ó OH ó OL ó ML-CL	(1) Cemento Portland (2) Cal	LL menor de 40 e IP menor de 10 IP no menor de 12		Materiales orgánicos y altamente ácidos que se encuentran dentro de esta área no son susceptibles a la estabilización por mecanismos ordinarios.

^a La clasificación del suelo corresponde a MIL-STD-619B. Restricción en el límite líquido y el índice de plasticidad (IP) está de acuerdo con el Método 103 en MIL-STD-621A.

^b $IP \leq 20 + \frac{50 - \text{porcentaje pasando malla No. 200}}{4}$

Fuente: DOD, 1994

2. METODOLOGÍA PROPUESTA

El proyecto se divide en 4 fases bien definidas, con alcances específicos para el cumplimiento del objetivo final.

2.1 Investigación bibliográfica

Esta fase comprende la revisión bibliográfica para registrar los estudios que se hayan realizado con anterioridad sobre el tema de estabilización con cemento. El principal insumo para llevar a cabo esta fase de la investigación está constituido por los informes previos realizados por el LanammeUCR en temas similares relacionados con la estabilización con cal, así como todo el conocimiento y aprendizaje obtenido en los ensayos de laboratorio relacionados con temas similares. De la misma forma se utilizará como insumo las entrevistas y recopilación de la experiencia de profesionales de gran prestigio con experiencia en el uso de este tipo de materiales en el país.

2.2 Caracterización de la materia prima (material de base y cemento)

En esta etapa se ejecutarán los ensayos necesarios para caracterizar el material, conforme a los procedimientos estándar para identificar si los materiales presentes en el sitio son adecuados para la estabilización con cemento. Los ensayos a realizar son los siguientes:

- **IT-GC-01 Granulometría de suelos, mediante mallas e hidrómetro:** Tiene por objeto determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas del material. Mediante este ensayo se determina la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca. En el caso de las partículas con un tamaño superior a 0,075mm (Malla No. 200 ASTM) se emplea la separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura. En el caso de partículas con tamaño inferior a 0,075mm (Malla No. 200 ASTM) se emplea la separación por sedimentación y medición con hidrómetro.
- **IT-GC-05 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad:** Tiene por objeto determinar la plasticidad del material. La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos de poder deformarse, hasta cierto límite, sin romperse. Los límites de consistencia o límites de Atterberg, se determinan empleando material que pase la malla No. 40.

- **IT-GC-06 Compactación de suelo (Próctor Modificado):** Tiene por objeto observar la relación que existe entre el grado de humedad y el peso volumétrico máximo para ese material y esa energía de compactación, con la finalidad de valorar el aumento en la resistencia y reducción de la compresibilidad. La prueba consiste en la determinación del peso por unidad de volumen de un material que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad.
- **IT-GC-08 Índice de soporte de California (CBR):** El CBR es un índice de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo en condiciones determinadas de compactación y humedad, sujeto a un determinado periodo de saturación. Se expresa como el tanto por ciento de la carga necesaria para introducir un pistón de sección circular en una muestra de suelo, respecto a la necesaria para que el mismo pistón penetre la misma profundidad en una muestra patrón definida por el ensayo.
- **ASTM C157 Cambios en la Longitud del Concreto Endurecido (Contracción Térmica):** Tiene por objetivo determinar los cambios de longitud que se pueden dar durante el endurecimiento en especímenes de material estabilizado elaborados en laboratorio y expuesto a condiciones controladas de humedad y temperatura.
- **ASTM C186 Calor de hidratación:** Tiene por objetivo determinar el calor de hidratación del cemento hidráulico comparando el calor de una solución de cemento seco y el calor de porción de esa solución que ha sido parcialmente hidratada por 7 y 28 días.

2.3 Estabilización del suelo con la incorporación del cemento

En esta etapa se ejecutarán los diseños de base estabilizada para determinar el contenido de cemento óptimo que se utilizará en campo para la estabilización del material. El diseño de base estabilizada consta de los siguientes ensayos:

- **ASTM D558 Determinación de la relación humedad-densidad de una mezcla de suelo y cemento:** Tiene como objetivo determinar la relación entre el contenido de agua y la densidad de una mezcla de suelo y cemento cuando es compactada antes de que la hidratación del cemento haya prescrito. Para cada contenido de cemento a evaluar, se debe determinar la relación humedad-densidad. Los especímenes se deben compactar utilizando la energía de compactación de Próctor Estándar.

- **ASTM D1633 Resistencia a la compresión inconfiada de materiales estabilizados:** Tiene por objeto determinar la resistencia al corte del espécimen basado en los resultados de la prueba de compresión simple o prueba de compresión axial no confinada. Se realiza este ensayo para cada contenido de cemento y se grafica contenido de cemento versus resistencia a la compresión. Para una resistencia establecida previamente, se busca en el gráfico el contenido de cemento óptimo.
- **ASTM C496 Prueba indirecta a la tensión diametral:** Tiene por objetivo determinar la resistencia a la tensión de materiales estabilizados. El ensayo consiste en la aplicación de carga a compresión de forma constante a lo largo del plano diametral del espécimen hasta que se produzca la fractura. De igual manera que la prueba de resistencia a la compresión, se realiza para cada contenido de cemento.

Una vez obtenido el contenido de cemento óptimo, se ejecutarán los siguientes ensayos para el material estabilizado resultante:

- **IT-GC-05 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad:** Tiene por objeto determinar el cambio en la plasticidad de un suelo tras el proceso de estabilización con cemento.
- **ASTM C78 Resistencia a la flexión:** la resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción de un material mejorado o estabilizado con cemento. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (M_r), y representa cerca del 10% al 20% de la resistencia a la compresión.
- **Determinación del módulo dinámico de vigas sometidas a flexión:** en este ensayo se aplican cargas repetitivas a una viga sometida a flexión, el objetivo del ensayo es determinar el módulo dinámico.
- **Resistencia a la fatiga de vigas sometidas a flexión:** la fatiga es el fenómeno de agrietamiento o fractura bajo esfuerzos repetitivos, con magnitudes menores a la resistencia por tensión del material. El ensayo de flexión de vigas es el más apropiado para examinar la resistencia al agrietamiento por fatiga.

Adicionalmente, se repetirán los ensayos de **Próctor Modificado (IT-GC-06)** para el material estabilizado con diferentes contenidos de cemento, con la finalidad de evaluar variaciones en los contenidos de humedad y densidad del material estabilizados, así como eventuales incrementos de resistencia.

2.4 Construcción y evaluación en campo de tramos estabilizados con cemento

En esta etapa se construirán tramos de pruebas con una longitud no menor a 50 metros, por el ancho completo del carril (o carriles) de circulación, en los cuales se documentará el proceso constructivo ejecutado y se monitoreará el cumplimiento de los estándares especificados al final de la etapa constructiva, principalmente los contenidos de cemento reales adicionados al material presente y el porcentaje de compactación logrado en campo, entre otras variables importantes.

Una vez establecidos los parámetros de inicio del proyecto se llevará a cabo un monitoreo sucesivo del desempeño y la condición del tramo de prueba donde se ejecutarán los ensayos necesarios para obtener resultados en campo para evaluar características físico-mecánicas. Dicho monitoreo se realizará en al menos 2 momentos del año, y entre los parámetros que se medirán se encuentran: contenido de humedad, densidad y deflexiones. A continuación se mencionan los ensayos que se plantean realizar:

- **ASTM D1556 Densidad del suelo en sitio por el método del cono de arena:** Tiene por objeto determinar la densidad de terreno y así verificar u obtener los resultados obtenidos en la compactación de suelos. El método consiste en la determinación del peso del suelo retirado de un volumen de una pequeña excavación de forma cilíndrica (sin pérdidas de material), que permite determinar la densidad húmeda. Determinaciones de la humedad de esa muestra nos permiten obtener la densidad seca.
- **ASTM D2922 Densidad unitaria del suelo en sitio por método nucleares:** Otro método de analizar la densidad del suelo y comparar la compactación del mismo con los requisitos del diseño. El método consiste en la determinación de la densidad húmeda en suelos y mezclas de suelo y agregado por medio de la radiación gamma. La determinación de la densidad es función de la masa por unidad de volumen detectada por medio de la radiación, con respecto a un valor de referencia.

- **IT-GC-02 Contenido de humedad en suelos y rocas:** Tiene por objeto determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo. El método consiste en la determinación de la diferencia de peso entre el suelo húmedo y el peso del suelo seco.
- **ASTM E2583 Medición de deflexiones con un Deflectómetro de Impacto Ligero (Light Weight Deflectometer, LWD):** Tiene por objeto calcular el módulo dinámico de respuesta del suelo ante la fuerza o pulso de carga producido al dejar caer un peso o una carga en una placa circular desde una altura controlada. El equipo mide la deformación vertical (deflexión) mediante sensores en el punto de impacto. Este equipo es usado principalmente para hacer pruebas in situ durante las construcciones.
- **ASTM D4694 Medición de deflexiones con un Deflectómetro de Impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD):** Otra metodología para calcular el módulo dinámico del material. A diferencia del LWD el FWD consta de varios sensores de deformación que le permiten registrar el cuenco de deflexiones del material estabilizado. Adicionalmente está en capacidad de aplicar cargas considerablemente mayores.
- **ASTM D6951 Método estándar para el uso de un Cono de penetración dinámico (CPD) en la aplicación de pavimentos de poco espesor:** Tiene por objeto determinar la capacidad de soporte del pavimento en capas de base y sub-base. La capacidad de soporte se determina midiendo la profundidad de penetración por número de golpes, que resulta de hincar en el suelo una punta cónica en el extremo de una varilla mediante la acción de una carga de 8 kg la cual cae desde una altura de 80 centímetros y penetra en el suelo.

A manera de resumen se presenta la **Figura 2** que muestra el experimental a seguir para la etapa de laboratorio y campo.

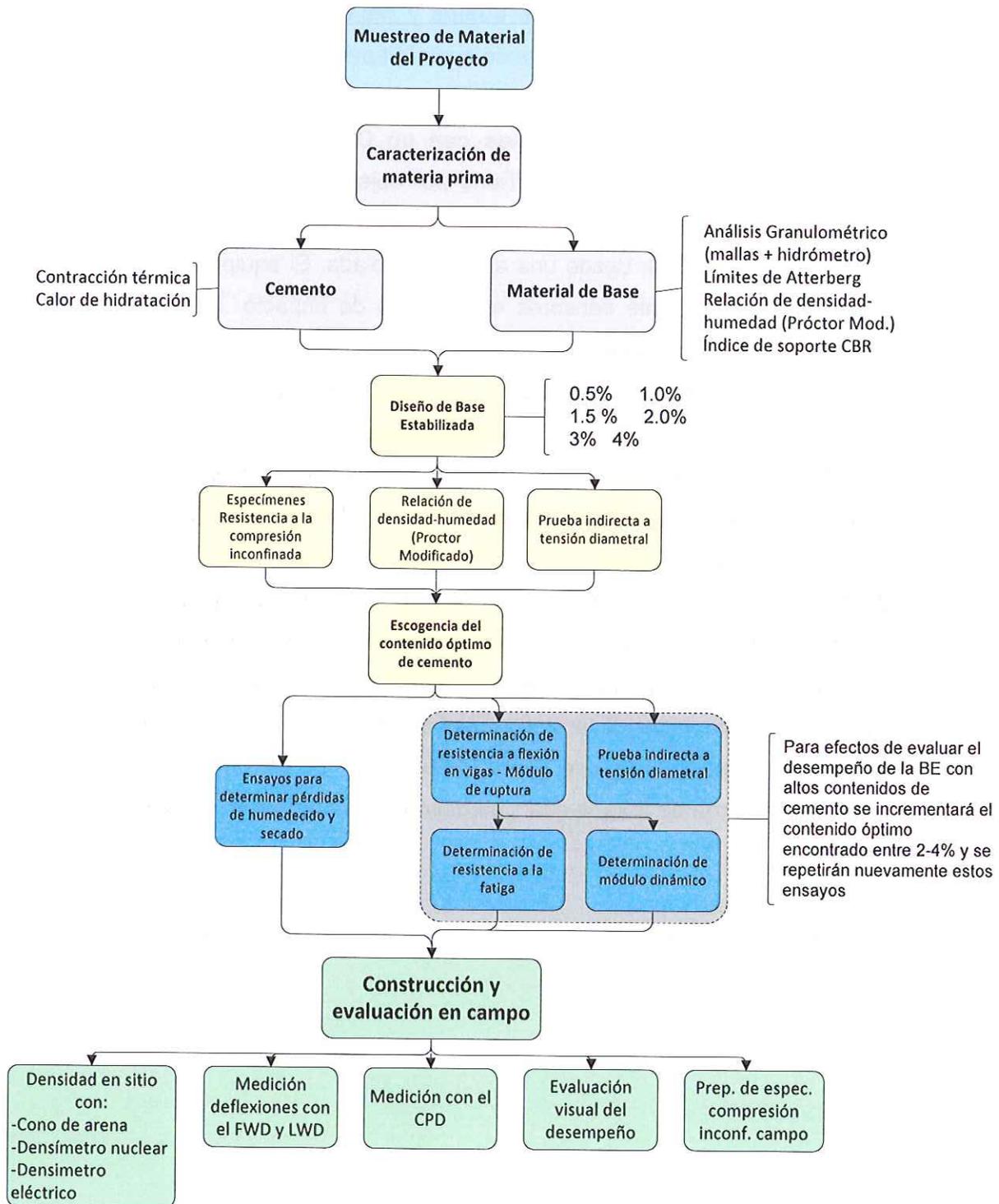


Figura 2. Esquema experimental

2.5 Análisis de resultados, hallazgos y observaciones

En esta etapa se analizarán y discutirán los hallazgos y observaciones significativas, en términos de las especificaciones, normativas, políticas y procedimientos utilizados que permitan mejorar la implementación de la estabilización con cemento en campo. Se analizará la influencia que tienen las propiedades de los materiales y el procedimiento constructivo y sus efectos en el desempeño, economía, durabilidad. Además, se discutirán las limitaciones existentes para que sean tomadas en cuenta en futuros proyectos de investigación o bien, en la construcción de nuevos tramos de carretera.

2.6 Elaboración de informes, publicaciones, manuales y productos

En esta fase se elaborarán los informes parciales y/o finales del desarrollo del proyecto y se publicarán los resultados, manuales y demás productos que se puedan obtener de la investigación.

3. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS

X	Artículo científico en revista indexada		Libro
	Artículo científico revista no indexada		Capítulo de libro
X	Artículo de divulgación	X	Especificaciones técnicas
X	Ponencias en congresos		Hardware
	Conferencias o seminarios		Software
	Patentes		Trabajos o proyectos de graduación
X	Diseño de cursos	X	Nuevas metodologías
	Formación de la comunidad científica		

Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Evaluación del desempeño en campo de materiales estabilizados con cemento	Publicaciones	Grupos de investigación que aborda el proyecto
Implementación de la metodología en laboratorio y construcción en campo de materiales estabilizados con cemento	Metodología	Consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Impacto a nivel nacional en la comunidad científica

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Interacción con laboratorios y consultores	Trabajo conjunto	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Formación de jóvenes investigadores	Participación de asistentes de investigación	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Especificaciones técnicas	Redacción de los resultados en especificaciones	Grupo de investigación que aborda el proyecto, consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Beneficios sociales y/o culturales

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Convenios de participación entre administradores, gobiernos locales, consultores, laboratorios, etc. en la aplicación de la metodología	Trabajo conjunto	Consultores, constructores, administradores, laboratorios e ingenieros relacionados con sector vial del país.

Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento de la Universidad de Costa Rica con el sector externo

Resultado/Productoesperado	Indicador	Beneficiario
Artículo científico en revista indexada	Publicaciones	Grupo de investigación que aborda el proyecto
Ponencias en congresos, seminarios y/o simposios	Ponencias	
Fortalecimiento de vínculos de apoyo y reconocimiento	Cooperación científica	

4. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

El equipo de investigación que será responsable de la ejecución del proyecto de investigación, así como el tiempo que le dedicará a la misma.

Tabla 2. Responsables del proyecto de investigación

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Gustavo Badilla Vargas	Licenciatura	Interino	Investigador principal	5	12
Tania Ávila Esquivel	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	5	12

5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Una vez reconocidas las etapas que formarán parte de la investigación se define un cronograma genérico que permita una adecuada utilización de los recursos, una optimización del tiempo y el logro de los objetivos planteados.

Cemento	% Cemento	Ensayo	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	
Muestra material		Secado y preparación de materiales (tamizado)	■													
Caracterización del cemento a utilizar		ASTM C186 Calor de hidratación	■	■												
		ASTM C157 Cambios en la Longitud del Concreto Endurecido (Contracción Térmica)	■	■												
Caracterización de material de base		IT-GC-01 Granulometría de materiales granulares		■												
		IT-GC-05 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad		■												
		IT-GC-06 Compactación de suelo (Próctor Modificado)			■											
		IT-GC-08 Índice de soporte de California (CBR)				■										
Cemento X Fabric. Y	Bajo o Alto	IT-GC-06 Compactación de suelo (Próctor Modificado)					■									
		ASTM D1633 Resistencia a la compresión inconfiada de materiales estabilizados						■			■					
		ASTM D559-96 Humedecido y secado de materiales estabilizados									■	■	■	■	■	■
		IT-GC-08 Índice de soporte de California (CBR)								■	■					
		ASTM C496 Prueba indirecta a la Tensión Diametral									■	■				
		ASTM C78 Resistencia a la flexión													■	
		Determinación del módulo dinámico de vigas sometidas a flexión										■	■	■		
		Resistencia a la fatiga de vigas sometidas a flexión										■	■	■	■	
Construcción y monitoreo de los tramos de prueba		ASTM D2922 Densidad unitario del suelo en sitio por métodos nucleares										■				
		ASTM D1556 Densidad del suelo en sitio por el método del cono de arena										■				
		IT-GC-02 Contenido de humedad en suelos y rocas										■				

Cemento	% Cemento	Ensayo	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13
Construcción y monitoreo de los tramos de prueba		Moldeo de especímenes de resistencia a compresión confinada en sitio													
		ASTM D1633 Resistencia a la compresión confinada de materiales estabilizados													
		ASTM E2583 Medición de deflexiones con un Deflectómetro de Impacto Ligero (Light Weight Deflectometer, LWD)													
		ASTM D6951 Cono de penetración dinámico (CPD) (*)													
		ASTM D4694 Deflectometría de impacto (FWD) (*)													
		Evaluación visual del desempeño del tramo estabilizado con cemento (*)													

(*) Notas:

Se realizarán evaluaciones periódicas a: 1 mes, 2 meses, 3 meses, 6 meses, 9 meses, 12 meses y 18 meses.

Deberá indicarse el tipo de Cemento a utilizar (Cemento X) y la empresa Fabricante (Fabric. Y)

6. RECURSOS NECESARIOS

Tabla 3. Administración, transporte de materiales y ponencias (US\$)

Descripción	Justificación	Valor
Publicaciones	Recopilación de información, libros y publicaciones en revistas nacionales e internacionales requeridas para la ejecución del proyecto de investigación	100
Papelería, fotocopias, transportes y viáticos	Informes, publicaciones, documentación, transporte de muestras de ensayo, viáticos para elaboración o mediciones, etc.	400
Participación en congresos	Presentación de los resultados en eventos nacionales y/o internacionales de relevancia	3000
Total (US\$)		3500

Tabla 4. Descripción de los ensayos de campo/laboratorio a realizar por tipo de cemento a estudiar

Ensayos a realizar	Cont. bajo de cemento	Cont. alto de cemento
IT-GC-01 Granulometría de materiales granulares	1	
IT-GC-05 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de Plasticidad	1	
IT-GC-06 Compactación de suelo (Próctor Modificado)	1	
ASTM C157 Cambios en la Longitud del Concreto Endurecido (Contracción Térmica)	1	1
ASTM C186 Calor de hidratación	1	1
IT-GC-08 Índice de soporte de California (CBR)	1	
ASTM D1633 Resistencia a la compresión confinada de materiales estabilizados	12	12
ASTM D559-96 Humedecido y secado de materiales estabilizados	2	2
IT-GC-08 Índice de soporte de California (CBR)	1	1
ASTM C496 Prueba Indirecta a la Tensión Diametral	6	6
ASTM C78 Resistencia a la flexión y Fatiga	10	10
ASTM D2922 Densidad unitario del suelo en sitio por métodos nucleares	8	
ASTM D1556 Densidad del suelo en sitio por el método del cono de arena	4	
IT-GC-02 Contenido de humedad en suelos y rocas	4	
Moldeo de especímenes de resistencia a compresión confinada en sitio	16	
ASTM D1633 Resistencia a la compresión confinada de materiales estabilizados	16	
ASTM E2583 Medición de deflexiones con un Deflectómetro de Impacto Ligero (Light Weight Deflectometer, LWD)	20 @ cada evaluación	
ASTM D6951 Método estándar para el uso de un Cono de penetración dinámico (CPD) en la aplicación de pavimentos de poco espesor	12 @ cada evaluación	
ASTM D4694 Deflectometría de impacto (FWD)	20 @ cada evaluación	
Evaluación visual del desempeño del tramo estabilizado con cemento	1 @ cada evaluación	

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. "ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C157: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C186: Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C496: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C1435: Standard Test Method for Molding Roller-Compacted Concrete In Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer".
- American Society for Testing and Materials. "ASTM C559-96: Standard Test Method for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures".
- Badilla, G.; Molina, D. "Implementación de la metodología de diseño para materiales tratados con cal en la construcción y evaluación del desempeño de tramos de prueba en un proyecto en ejecución". Proyecto UI-02-10 Unidad de Investigación. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 2010.
- Department of Defense (DOD) the Army, The Navy, and The Air Force. "UFC 3-250-11: Soil Stabilization for Pavements". Washington DC. United States. Octubre, 1994.
- Elizondo, F.; Sibaja, D. "Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas". Proyecto UI-06-08 Unidad de Investigación. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 2008.

- Elizondo, F. "Implementación de los ensayos de laboratorio para el diseño y evaluación del desempeño de materiales estabilizados con cal". Proyecto UI-06-09 Unidad de Investigación. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica, 2009.
- Halsed, G.; Luhr, D.; Adaska, W. "Guide to Cement-Treated Base (CTB)". Portland Cement Association (PCA). 2006
- Orozco, E. "Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de Infraestructura Vial". Informe de 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, 2007.

