



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

PROPUESTA: LM-PI-UMP-012-P




# **INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Propuesta de Investigación

Preparado por:  
**Unidad de Materiales y Pavimentos**

San José, Costa Rica  
enero de 2014



<b>1. Informe</b> LM-PI-UMP-012-P		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.		<b>4. Fecha del Informe</b> enero de 2014
<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> <p>Los valores de cohesión y ángulos de fricción, han sido utilizados tradicionalmente en la geotecnia, como propiedades fundamentales intrínsecas que dan las características del comportamiento mecánico de los materiales.</p> <p>En pavimentos, desde los años 50, se han realizado investigaciones con la finalidad de caracterizar el material de mezcla asfáltica de una forma similar, con la finalidad de analizar el comportamiento mecánico de este material de una forma más fundamental, pero con semejanza al proceso real.</p> <p>El trabajo con más aceptación fue el realizado por Smith (1951); éste propone una serie de gráficos a partir de los valores de cohesión y ángulo de fricción, que definen una zona dentro de la cual, las mezclas tienen un desempeño apropiado para ser utilizadas en pavimentos, en particular, el tema de resistencia a la deformación con el tiempo, el ensayo de Smith fue desechado por su alta complejidad y se adoptó de manera casi universal la estabilidad y flujo Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente.</p> <p>Años más tarde, con el desarrollo de tecnología más moderna, se desarrollaron investigaciones hacia la determinación de estos parámetros, por medio de metodologías matemáticas de aproximación del comportamiento mecánico como lo es el elemento finito. A la fecha no han desarrollado investigaciones que contemplen ambas metodologías (teórica por medio del elemento finito y práctica por medio de ensayos). Con la presente investigación, se pretende abordar ambos tópicos, estudiando el comportamiento mecánico del ensayo Marshall, para la predicción de los valores de estabilidad y flujo, a partir de los valores de los parámetros obtenidos del ensayo Triaxial de Smith.</p> <p>Con estos resultados, será posible proponer una metodología de diseño para mezcla asfáltica con concepción mecanístico-empírica, que permita el desarrollo de diseños con un mejor desempeño, enfocando las investigaciones principalmente hacia el estudio de la deformación permanente, que es una de los desafíos de la ingeniería de materiales y pavimentos.</p>		
<b>10. Palabras clave</b> DISEÑO DE MEZCLA, ELEMENTO FINITO, DAÑO POR HUMEDAD, DEFORMACIÓN PERMANENTE.	<b>11. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>12. Núm. de páginas</b> 18
<b>13. Preparado por:</b>		Ing. Paulina Leiva Padilla Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos   <hr/> <b>Fecha: 28 / 01 / 14</b>
<b>14. Revisado por:</b> Ing. José Pablo Aguiar, PhD Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos   <hr/> <b>Fecha: 28 / 01 / 14</b>	<b>15. Revisado y aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA   <hr/> <b>Fecha: 28 / 01 / 14</b>	





## TABLA DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	6
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.3. ANTECEDENTES.....	7
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	8
1.5. MARCO TEÓRICO .....	9
1.5.1. ENSAYO MARSHALL .....	9
1.5.2. ENSAYO TRIAXIAL DE SMITH.....	10
<b>2. METODOLOGÍA PROPUESTA .....</b>	<b>11</b>
<b>2. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS .....</b>	<b>14</b>
<b>3. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>15</b>
<b>4. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....</b>	<b>15</b>
<b>5. RECURSOS NECESARIOS.....</b>	<b>15</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>17</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ENSAYO MARSHALL.....	10
FIGURA 2. APARATO TRIAXIAL CONVENCIONAL .....	11

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESPONSABLES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	15
TABLA 2. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DEL PROYECTO .....	15
TABLA 3. ADMINISTRACIÓN, TRANSPORTE DE MATERIALES Y PONENCIAS (US\$) ...	16
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO A REALIZAR.....	16



## 1. INTRODUCCIÓN

Las metodologías de diseño de mezcla asfáltica tradicionales son: la Marshall, la Hveen y el método Superpave; otras metodologías históricamente reconocidas que pueden mencionarse son la Hubbard-Field, la Nottingham y la que se desarrolló a partir de los resultados del ensayo Triaxial de Smith.

El método de diseño de mezcla Marshall, fue formulado en sus inicios por el ingeniero Bruce Marshall del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi; más tarde, fue mejorado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos a través de diversas investigaciones mediante las cuales, se normalizó bajo la norma ASTM D1559.

El ensayo Marshall es un experimento de laboratorio, dirigido al diseño de mezclas asfálticas por medio del análisis de su estabilidad, flujo, densidad y vacíos. Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que se asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de rangos adecuados para asegurar una mezcla durable. Desafortunadamente una de sus grandes desventajas es el método de compactación de laboratorio por impacto el cual no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo el proceso constructivo y durante la operación de la vía que experimenta un pavimento real.

Ya que en Costa Rica comúnmente ha sido utilizada la metodología Marshall para el diseño y conociendo que esta es de concepción empírica, es que se ha decidido estudiar por medio de simulación matemática, los valores de estabilidad y flujo del ensayo Marshall, utilizando para ello las propiedades fundamentales de cohesión y ángulo de fricción, que caracterizan el material de la mezcla asfáltica costarricense.

Para la descripción de tales valores, se propone la implementación del ensayo triaxial de Smith, como una derivación del ensayo convencional de suelos pero para la caracterización de mezcla asfáltica. Además, se desarrollarán ensayos que caractericen el fenómeno de deformación permanente, con la finalidad de utilizar y correlacionar los valores obtenidos, con la respuesta que estos puedan tener.



### 1.1. Objetivo general

Determinar la influencia de las propiedades fundamentales de los materiales, cohesión y ángulo de fricción, en el diseño y el desempeño a la deformación permanente de las mezclas asfálticas en caliente de laboratorio convencionales y modificadas.

### 1.2. Objetivos específicos

- Realizar una investigación bibliográfica extensa acerca de modelación matemática y ensayos de laboratorio que son utilizados para determinar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, en específico, cohesión y ángulo de fricción, así como su relación con el fenómeno de deformación permanente.
- Implementar en laboratorio los ensayos más promisorios determinados en el objetivo anterior para la caracterización de mezclas asfálticas en el país.
- Caracterizar mezclas asfálticas costarricenses mediante los ensayos definidos en el objetivo anterior.
- Construir un modelo de elemento finito que simule los ensayos de Estabilidad-Flujo Marshall, Resistencia a la Tensión Diametral, y Triaxial de Smith, por medio de las propiedades mecánicas de ángulo de fricción y cohesión, de manera que se logre, a partir de la determinación de estos parámetros, el cálculo de la estabilidad, flujo, y resistencia de la mezcla, sin recurrir para ello a la realización del ensayo.
- Comparar los resultados obtenidos, validez estadística y practicidad de los ensayos realizados en el objetivo 2.
- Desarrollar modelos de correlación estadística entre las variables mecánicas del ángulo de fricción, cohesión, módulo y temperatura, que logren determinar por medio de ecuaciones numéricas, la estabilidad y el flujo de una mezcla asfáltica, como propuesta de metodología de diseño de mezcla alterna.
- Analizar la idoneidad de las especificaciones costarricenses actuales con respecto a estabilidad y flujo de las mezclas del país.
- Transferir el conocimiento que se ha desarrollado con la metodología del elemento finito, a un estudiante de pregrado que será contratado para soporte en el desarrollo de la investigación, y quien podrá posteriormente desarrollar su trabajo final de graduación alrededor del tema.





- Elaborar documentos de transferencia de tecnología para ingenieros locales, a través de la publicación de informes de investigación, especificaciones técnicas, boletines o manuales; así como artículos científicos para revistas internacionales, que permitan la evaluación de la calidad del fundamento científico de la investigación por medio de pares académicos.

### 1.3. Antecedentes

A principios de 1950, varios investigadores (McLeod 1950; Ensersby 1951; Goetz 1951; Smith 1951) decidieron aplicar el concepto del diseño de mezcla a partir de las propiedades de cohesión y fricción, modificando el ensayo triaxial convencional para suelos, a mezclas asfálticas con variación en temperatura para la obtención de estos dos valores. Sin embargo, debido a la complejidad de las pruebas en tiempo y dificultad de trasladar los resultados al campo, las investigaciones en este sentido dejaron de desarrollarse (Fwa, Tan y Zhu 2001).

Años después (Mamlouk et al. 1983), retomaron este tema e iniciaron una serie de estudios de modelación con elemento finito de la prueba Marshall, utilizando los valores de cohesión y ángulo de fricción de la mezcla, obtenidos de la modificación del ensayo triaxial de suelos para mezclas, como fue hecho años atrás. En estos estudios, se realizaron análisis experimentales y se simuló el comportamiento de la mezcla en la prueba Marshall. Se encontró que debido a la no-linealidad de la mezcla asfáltica, las deformaciones verticales de los puntos de contacto entre los especímenes y las cabezas de la máquina de ensayo aportan una tercera parte del valor de la estabilidad obtenida.

Luego en 1990, la Universidad de Singapore comenzó a desarrollar una serie de investigaciones teóricas, con el objetivo de retomar el concepto de diseño de mezcla propuesto principalmente por Smith en 1950 (Fwa et al. 1995, 1998, 2001, 2004 y 2005). Este método propone la utilización de las propiedades mecánicas de  $C$  y  $\phi$  de la mezcla para el diseño.

Como resultado de tales investigaciones, se demostró que el modelo  $C-\phi$  propuesto, puede determinar los parámetros Marshall utilizados en el diseño hasta la actualidad, a través de un análisis mecánico o semimecánico de la mezcla bajo una carga aplicada, por medio de análisis con la metodología del elemento finito, considerando adicionalmente los efectos de



la temperatura y velocidad de aplicación de la carga en el cálculo de la deformación permanente.

En esa misma década, (Tan et al. 1993 y 1994) realizaron una serie de investigaciones en este tema, analizando el comportamiento mecánico de la prueba Marshall a partir de las propiedades mecánicas de la prueba triaxial, y determinaron que el modelo Drucker-Prager puede ser utilizado para caracterizar el comportamiento del material de mezcla sobre la carga de falla del material, y que la simulación numérica de la prueba Marshall logra una buena predicción para el caso de la estabilidad, sin embargo para el caso del valor de flujo, el valor estimado es inferior al obtenido en el ensayo.

Posteriormente, (Tan et al. 1993 y 1994) efectuaron un análisis mecánico de la prueba triaxial y encontraron que los resultados mostraban que el ángulo de fricción, en el caso de un material de concreto asfáltico bien compactado, es función principalmente de la fricción de contacto y del entramamiento del agregado, condiciones que a su vez, son sensibles a la temperatura y tasa de deformación; así como la cohesión, dependiente además de las propiedades del ligante y de los finos de la mezcla.

#### **1.4. Justificación**

El diseño de la mezcla asfáltica en pavimentos flexibles, se ha basado hasta la actualidad en procedimientos empíricos que correlacionan de manera estadística, la respuesta del material ante una condición específica de carga y temperatura. El ensayo Marshall ha sido tradicionalmente utilizado para esta tarea; sin embargo, no contempla las características que describen el comportamiento mecánico real del material.

Las tendencias de la investigación en ingeniería en este momento, están orientadas a retornar a los conceptos que han sido la base de la ingeniería de materiales y pavimentos, es por este motivo que la presente investigación, pretende realizar un estudio que utilice la metodología del elemento finito, para el análisis mecánico del comportamiento de la mezcla asfáltica; para este objetivo, se realizarán ensayos que permitan describir las propiedades mecánicas que caracterizan a los materiales constituyentes y validen los modelos desarrollados.



Cabe destacar que en este tema, existen investigaciones en modelación realizadas, sin embargo, los resultados no han sido validados y verificados con los ensayos apropiados.

### 1.5. Marco teórico

La aplicación de las propiedades fundamentales de ángulo de fricción y cohesión en el diseño de mezclas asfálticas, ha sido tema de investigación desde la década de los 50s.

El trabajo realizado por Smith (1951), ha sido uno de los de mayor aceptación en este tema. Este consiste en la utilización de las propiedades de ángulo de fricción y cohesión de la mezcla asfáltica, obtenidas a partir del ensayo triaxial convencional para suelos, para la clasificación de mezclas con condiciones satisfactorias, insatisfactorias o cuestionables de desempeño, más detalles de esta metodología, serán expuestos en los informes de la fase de investigación literaria de la presente investigación.

Posteriormente, con el desarrollo de la tecnología, se desarrollaron investigaciones que contemplaban el uso de la metodología del elemento finito para el análisis mecánico del ensayo Marshall, tradicional empírico, para el diseño de mezcla asfáltica, a partir de correlaciones con las propiedades de cohesión y fricción de la mezcla, sin embargo no se han hecho estudios que contemplen la validación de los modelos con ensayos de laboratorio, que es el aporte que desea hacer la presente investigación.

Ante este contexto, se ha importante mencionar detallar un poco más acerca de los ensayos Marshall y Triaxial de Smith, que se mencionan a continuación.

#### 1.5.1. Ensayo Marshall

Este ensayo surgió de investigaciones y correlaciones iniciadas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943, que pretendían mejorar el método previamente propuesto por Bruce Marshall del Departamento de Carreteras del Estado de Misisipi. Este procedimiento fue normalizado por la Sociedad Estadounidense de Ensayos y Materiales (ASTM) bajo la designación ASTM – 1559, con el nombre de Procedimiento Estándar para la Determinación del Flujo Plástico de la Mezcla Bituminosa usando el equipo Marshall.

El ensayo Marshall convencional consiste en la introducción de al menos 4 especímenes de prueba, previamente compactados bajo la metodología de compactación Marshall, en un

baño de agua a  $60 \pm 1$  °C, durante 30 minutos. Pasado este tiempo, se coloca cada espécimen en la muela de carga, se ajusta el medidor de flujo a cero, y se aplica carga a una velocidad de  $50 \pm 5$  mm/min hasta que la lectura de la carga aplicada llegue al máximo y tienda a disminuir. En la figura siguiente se puede observar el cabezote del equipo que se utiliza en el ensayo Marshall.

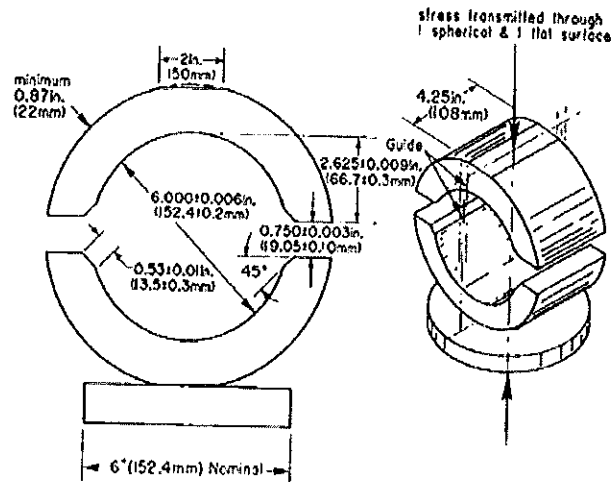


Figura 1. Ensayo Marshall.

Fuente: Norma ASTM para estabilidad y flujo Marshall

### 1.5.2. Ensayo Triaxial de Smith

El ensayo triaxial tuvo sus orígenes con el desarrollo del primer aparato triaxial para el ensayo de suelos definido por Arthur Casagrande. Esta labor fue realizada por Casagrande durante su trabajo en la presa de las Cataratas Franklin, de la Estación Experimental de Canales (WES, por sus siglas en inglés), del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. (Jayawickrama, Merrick y Senadheera 2009).

Este ensayo está normado bajo dos designaciones ASTM, la D 2850 y la D4767, correspondientes a los ensayos de compresión triaxial no consolidado no drenado (UU) y consolidado drenado (CD) en suelos. Es utilizado en suelos para evaluar la resistencia plástica o semiplástica al corte.

El procedimiento de ensayo consiste en preparar el espécimen de ensayo, en forma inalterada o por medio de compactación, en cuyo caso deberá cuidarse de realizar la preparación con el contenido de agua requerido. Posteriormente se monta el espécimen en

el aparato triaxial, en el método húmedo o seco, que va a depender de la saturación inicial de la muestra. Realizado esto, se satura la muestra y se deja consolidar en la cámara triaxial, registrando su deformación. Cuando el espécimen está listo, se cierran las válvulas de drenaje y se carga hasta la falla. La velocidad de carga por lo general es de 1 mm/min. Se deben tomar medidas simultáneas hasta que la deformación alcance el 25% de la altura inicial del espécimen. En la Figura siguiente se puede observar un esquema del aparato triaxial convencional.

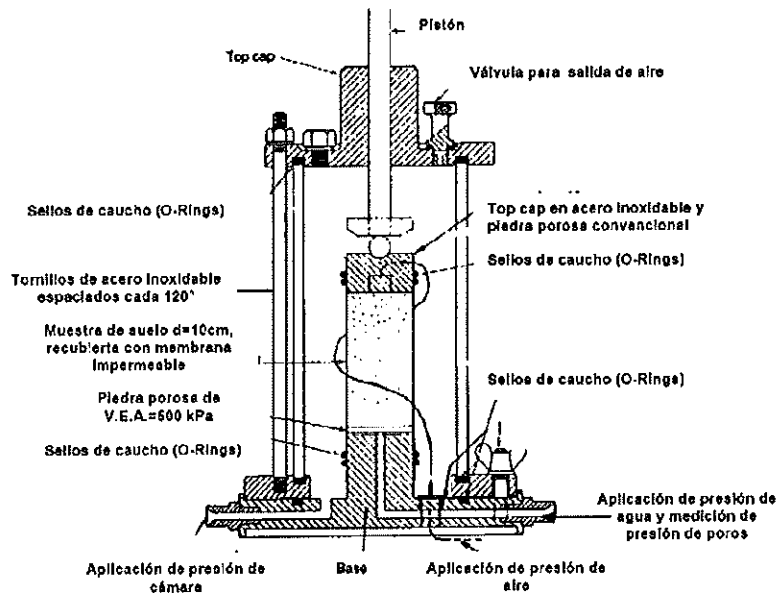


Figura 2. Aparato triaxial convencional  
Fuente: (Pineda 2004)

## 2. METODOLOGÍA PROPUESTA

El trabajo de la investigación se ha definido en 4 fases, que se especifican a continuación:

### FASE 1: REVISIÓN LITERARIA Y PREPARACIÓN DE UN MODELO DE ELEMENTO FINITO

#### Actividad 1. Revisión literaria del uso de cohesión y ángulo fricción para mezclas asfálticas

Esta actividad consistirá en revisión bibliográfica de investigación reciente y esfuerzos realizados, en el diseño de mezcla por medio de las propiedades fundamentales de cohesión

Propuesta LM-PI-UMP-012-P	Fecha de emisión: 28 de enero de 2014	Página 11 de 18
---------------------------	---------------------------------------	-----------------



y ángulo de fricción de mezclas asfálticas, así como de los ensayos usados para la determinación de tales valores. La revisión incluirá el análisis de al menos 30 publicaciones.

Para esta actividad se realizará un informe final y artículo científico, que recopile la documentación y hallazgos encontrados.

### **Actividad 2. Revisión de literatura acerca de modelación de mezcla asfáltica por medio de la metodología de elemento finito**

Para esta actividad, se recopilará información de las investigaciones realizadas a la actualidad, relacionadas con la modelación matemática por medio del método de elemento finito, del material de mezcla asfáltica, a partir de las propiedades mecánicas fundamentales de cohesión y ángulo de fricción, tradicionalmente utilizada en el área de geotecnia para describir el comportamiento mecánico de los materiales.

Para esta actividad se realizará un informe final y boletín técnico, con los resultados obtenidos.

## **FASE 2: IMPLEMENTACIÓN DE ENSAYOS**

### **Actividad 3. Montaje de ensayos**

La finalidad de esta actividad será cumplir con el segundo de los objetivos de la investigación. Para su desarrollo, el equipo de investigación utilizará los resultados obtenidos de la fase anterior y su juicio ingenieril, de manera que, con los equipos disponibles en el laboratorio y realizando las modificaciones necesarias y accesibles, sea posible la determinación de las propiedades necesarias, para la generación de una metodología de diseño de mezcla de carácter mecanístico-empírico y su relación con el fenómeno de la deformación permanente.

Para esta actividad se realizará un informe final con la descripción de los ensayos que se han propuesto para la investigación, su propósito y las modificaciones necesarias.

### **Actividad 4. Desarrollo de ensayos**

Una vez definidos los ensayos y el procedimiento específico a realizar, se llevarán a cabo los ensayos para tres mezclas asfálticas, una con asfalto virgen y dos modificadas con polímero.

Propuesta LM-PI-UMP-012-P	Fecha de emisión: 28 de enero de 2014	Página 12 de 18
---------------------------	---------------------------------------	-----------------



Los resultados obtenidos serán evaluados por el equipo de investigación con base en sus conocimientos técnicos, de las teorías que definen la mecánica de materiales y estructuras de pavimentos y serán resumidos en un informe de investigación y artículo científico.

### FASE 3: VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE ELEMENTO FINITO CON LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

#### **Actividad 5. Comparación de los resultados de laboratorio con los modelos de simulación**

En esta actividad el equipo de investigación con base en su conocimiento técnico, deberá realizar una comparación estadística de los resultados de los ensayos y los modelos de simulación del comportamiento mecánico de los mismos. De esta manera se logrará validar, el trabajo de la modelación y la practicidad de las metodologías y técnicas a proponer en el diseño y análisis de desempeño de las mezclas asfálticas.

Los resultados obtenidos se darán a conocer por medio de un informe de investigación y artículo científico.

### FASE 4: REPORTE FINAL

Esta fase consistirá en la preparación de un informe final con todos los datos generados en las Fases 1, 2 y 3.

El equipo de investigación, con base en sus conocimientos técnicos, deberá analizar la interacción de los resultados de cada una de las fases, con los descubrimientos hechos a la fecha en el tema y los nuevos descubrimientos obtenidos, para de esta manera, definir nuevas metodologías de diseño y análisis de mezclas asfálticas, así como, especificaciones técnicas asociadas a ensayos y construcción de pavimentos.



## 2. RESULTADOS / PRODUCTOS ESPERADOS

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

### Generación de nuevo conocimiento: Científico y/o Académico

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Nueva metodología de diseño de mezcla asfáltica.	Publicaciones científicas.	Ingenieros de pavimentos diseñadores.

### Impacto a nivel nacional en la comunidad científica

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Formación de jóvenes investigadores.	Participación de estudiante asistente de investigación.	Grupo de investigación y estudiante de la escuela de ingeniería civil.

### Beneficios sociales y/o culturales

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Definición de mejores métodos de producción y diseño de materiales.	Especificaciones técnicas.	Constructores y consultores del sector vial del país.
Interacción con constructores.	Trabajo conjunto.	Grupo de investigación, constructores involucrados en el proyecto, diseñadores, consultores, ingenieros del gobierno (MOPT-CONAVI).

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

Resultado/Producto esperado	Indicador	Beneficiario
Artículo científico en revista indexada.	Publicaciones.	Grupo de investigación, academia, consultores, constructores, productores del sector vial del país.
Ponencias en congresos, seminarios y/o simposios.	Ponencias.	
Fortalecimiento de los vínculos de apoyo y reconocimiento.	Cooperación científica.	

Propuesta LM-PI-UMP-012-P	Fecha de emisión: 28 de enero de 2014	Página 14 de 18
---------------------------	---------------------------------------	-----------------



### 3. CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

El equipo de investigación responsable de la ejecución del proyecto y su dedicación de tiempo será.

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

Investigador / Colaborador	Grado académico	Estado en régimen	Función en el proyecto	Dedicación semanal (horas)	Meses
Luis Guillermo Loria Salazar	Doctorado	Catedrático	Investigador principal	3	18
Paulina Leiva Padilla	Licenciatura	Interino	Investigador asociado	4	18
Jorge Castro Ortiz	Estudiante de pregrado	Interino	Investigador asociado	15	18

### 4. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El cronograma de las actividades necesarias para el desarrollo de la investigación, se resumen en el siguiente diagrama de Gantt.

**Tabla 2.** Cronograma de actividades del proyecto

Etapa	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18
Modelación	■	■	■	■														
Coordinación y traslado de materiales al laboratorio					■	■	■	■	■	■								
Ensayos para mezcla virgen											■	■	■	■	■	■	■	■
Ensayos para mezcla modificada con SBR												■	■	■	■	■	■	■
Ensayos para mezcla modificada con SBS															■	■	■	■
Elaboración de informes y artículos	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Desarrollo de especificaciones																	■	■

### 5. RECURSOS NECESARIOS

En este apartado debe definirse los recursos necesarios para la ejecución adecuada del proyecto de investigación.



**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	\$500
Materiales y elementos adicionales.	Compra de asfalto, sacos, barriles, bolsas.	\$500
Papelería, fotocopias, transportes y viáticos	Informes, publicaciones, documentación, transporte de muestras de ensayo, viáticos para elaboración o mediciones, etc.	\$500
Participación en congresos	Presentación de los resultados en eventos nacionales y/o internacionales de relevancia	\$10 000
<b>Total</b>		<b>\$11 500</b>

**Tabla 4.** Descripción de los ensayos de laboratorio a realizar

Ensayo	Justificación	Cantidad
AASHTO R 35: Procedimiento para el Diseño de Mezcla Utilizando el Método Marshall	Diseño de mezcla.	2 réplicas para 1 mezcla virgen y 2 modificadas.
AASHTO T245: Procedimiento para Determinar la Resistencia al Flujo Plástico de Especímenes Compactados con el Método Marshall.	Caracterización y validación del proceso de modelación con elemento finito.	2 réplicas para 1 mezcla virgen y 2 modificadas.
Triaxial de Smith: Ensayo modificado con implementación modificada en laboratorio.	Caracterización de los parámetros de cohesión y fricción de las mezclas para modelación.	2 réplicas para 1 mezcla virgen y 2 modificadas, a tres temperaturas distintas y cuatro velocidades de aplicación de carga.
AASHTO TP 62: Método de ensayo para la determinación del módulo dinámico de mezclas asfálticas en caliente (Curva Maestra).	Caracterización del valor del módulo para modelación.	2 réplicas para 1 mezcla virgen y 2 modificadas.
AASHTO T 324: Método de ensayo para probar mezclas asfálticas en caliente (MAC) en el equipo Rueda de Hamburgo	Ensayo adicional para el estudio del fenómeno de deformación permanente.	2 réplicas para 1 mezcla virgen y 2 modificadas.
NCHRP 465: Ensayo de creep dinámico/número de flujo en mezclas asfálticas a la compresión uniaxial.	Ensayo adicional para el estudio del fenómeno de deformación permanente.	2 réplicas para 1 mezcla virgen y 2 modificadas.



## 6. REFERENCIAS

Endersby, V. «The History and Theory of Triaxial Testing, and the Preparation of Realistic Test Specimens.» A Report of the Triaxial Institute, ASTM Special Technical Publication 106, Triaxial Testing of Soils and Bituminous Mixes, 1951.

Fwa, T, S Tan, y L Zhu. «Reexamining Cohesion - Friction Angle for Asphalt Paving Mix Design.» *Journal of Transportation Engineering*, 2001: 67 - 73.

Gu, Jie. *Computational modeling of geogrid reinforced soil foundation and geogrid reinforced base in flexible pavements*. Louisiana, United States: Dissertation submitted to the Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, 2011.

Huang, Y. *"Pavement Analysis and Design"*. New Jersey, United States of American: Prentice-Hall, Inc, 2004.

Hveem, F, y T Stanton. «Role of the Laboratory in the Preliminary Investigation and Control of Materials for Low Cost Bituminous Pavements.» Proceedings, Highway Research Board, Vol 14, 1935.

Jayawickrama, Priyantha, Michael Merrick, y Sanjaya Senadheera. *Develop a New Testing and Evaluation Protocol to Assess Flexbase Performance Using Strength of Soil Binder*. Technical Report, Texas: Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Department of Civil and Environmental Engineering, Texas Tech University, 2009.

Leiva et al. *Comparación entre modelación de respuestas de pavimentos flexibles con análisis de multicapa elástica, viscoelasticidad y elemento finito*. Río de Janeiro, Brasil: XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, 2011.

Nijboer, L. *Mechanical Properties of Asphalt Materials and Structural Design of Asphalt Roads*. Proceedings, Vol. 33, Highway Research Board, 1954.



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales

Pineda, Jubert. *Influencia de la succión sobre la resistencia al corte de un suelo compactado*. Tesis realizada para optar al título de Magíster en Ingeniería-Geotecnia , Universidad Nacional de Colombia, 2004.

Smith, V. *Application of the Triaxial Test to Bituminous Mixtures*. ASTM Special Technical Publication 106, Triaxial Testing of Soils and Bituminous Mixes, California: California Research Corporation Method, 1951.