

PROPUESTA DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN RELACIONADOS CON CONCRETO HIDRÁULICO

La Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR, en conjunto con el ICCYC, Holcim, Cemex, contratistas y consultores; va a iniciar una serie de proyectos de investigación relacionados con el análisis, diseño y evaluación del desempeño del concreto hidráulico, como material de construcción para pavimentos.

El trabajo se realizará inicialmente a partir de cuatro grandes tópicos a saber:

1. Análisis de costo de ciclo de vida (*Life-cycle cost analysis, LCCA*)
2. Ensayos de caracterización de materiales en laboratorio y evaluación en campo
3. Modelación en programas de computacionales para la obtención de parámetros mecanísticos.
4. Materiales granulares y suelos estabilizados con cemento

Para cada uno de los tópicos anteriores se menciona a continuación algunos de los temas que serán desarrollados con mayor profundidad:

1. ANÁLISIS DE COSTO DE CICLO DE VIDA (*LIFE-CYCLE COST ANALYSIS, LCCA*)

El diseño de pavimentos, sean nuevos o rehabilitados, requiere de la predicción del número de cargas que puede resistir el pavimento. En general, en el diseño de pavimentos se busca determinar el tiempo requerido para que el pavimento exhiba un determinado grado de deterioro. Así pues, típicamente se han usado periodos de diseño entre 10, 20 o más años. El periodo de vida útil, a menudo referido como periodo de diseño, es definido como el periodo de tiempo entre la construcción o rehabilitación del pavimento y el momento en que este alcanza un grado de serviceabilidad mínimo.

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 1 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

En general las guías de diseño tanto de pavimentos rígidos y flexibles estimulan el uso de períodos de análisis importantes, incluyendo al menos un periodo de rehabilitación. Adicionalmente, se debe distinguir dos conceptos que habitualmente se confunden: Periodo de desempeño o vida útil, y el periodo de análisis. El periodo de análisis es el tiempo total que cada estrategia de diseño debe cubrir y por lo tanto, debe ser mayor o igual al periodo de desempeño. En la figura 1 se muestran los principales conceptos y elementos que deben tenerse en consideración en cualquier análisis de costo de ciclo de vida.

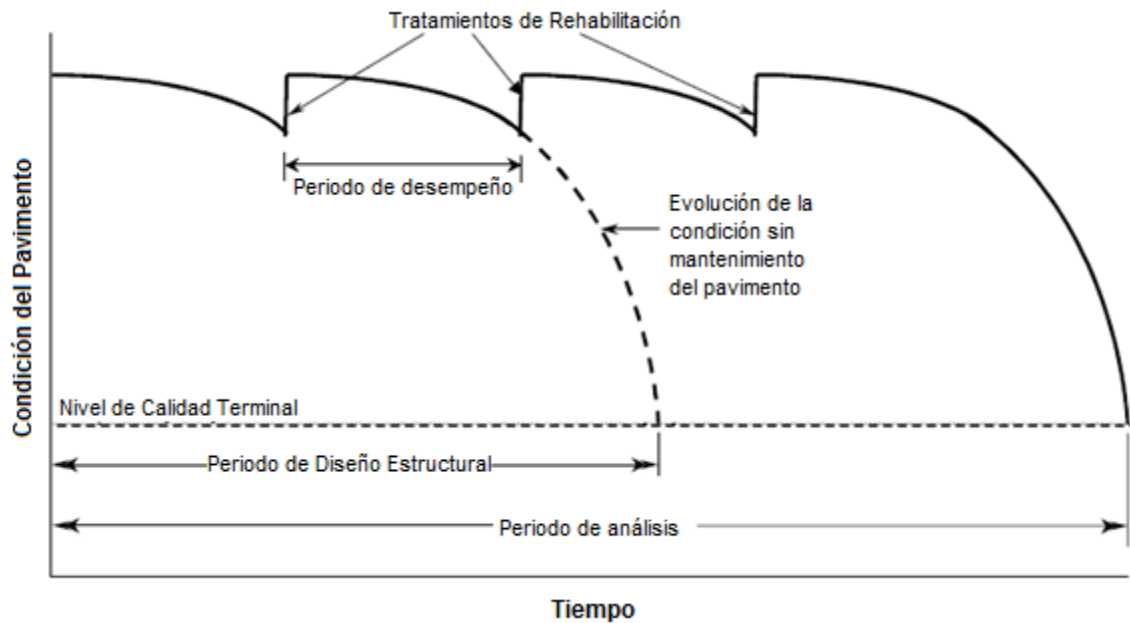


Figura 1. Elementos a considerarse en Análisis de Costo de Ciclos de Vida

Fuente: *Pavement Type Selection Protocol. Washington State Department. 2005*

1.1. PERIODO DE DESEMPEÑO O VIDA ÚTIL (PERFORMANCE PERIOD):

Con el paso del tiempo, la condición del pavimento se deteriora gradualmente hasta un punto donde es necesario algún tipo de tratamiento de rehabilitación. Así, el periodo de desempeño consiste en el tiempo transcurrido entre la construcción o rehabilitación de un pavimento y el momento en que este alcanza un grado de serviceabilidad mínimo. El periodo de desempeño también puede denominarse como *periodo de diseño* y debe ser seleccionado dentro los límites mínimos y máximos establecidos por las políticas y experiencia del departamento de

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 2 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

transporte. La selección del periodo dependerá de la clasificación funcional del pavimento, el tipo y nivel de mantenimiento aplicado, los fondos disponibles para la construcción inicial, ciclos de costo de vida, y otras consideraciones ingenieriles. Para el periodo de desempeño, el diseñador debe seleccionar los límites mínimos y máximos, los cuales vienen dados por la experiencia de la Agencia de transportes y sus políticas.

Debe tenerse claro que el periodo de desempeño máximo, es el tiempo máximo en el cual el usuario puede esperar que el indicador de desempeño esté sobre el umbral mínimo especificado en una etapa dada. Es decir, si la experiencia indica que las áreas de pavimentos originalmente diseñados para al menos 20 años, requerirán algún tipo de rehabilitación dentro los primeros 15 años posteriores a la construcción para mantenerse dentro de un umbral mínimo, entonces estos 15 años representarán el periodo de desempeño esperado para este diseño

El periodo de desempeño no debe ser confundido con la vida del pavimento, puesto que la vida del pavimento puede ser extendida por la rehabilitación periódica de la superficie o estructura del pavimento.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que la selección de periodos de tiempo muy extensos puede conllevar a obtener diseños poco realistas en el campo. Por ello, si se considera un análisis de costos por ciclos de vida, es necesario tener en cuenta periodos máximos de desempeño que sean prácticos conforme al tipo de pavimento.

1.2. PERIODO DE ANÁLISIS (ANALYSIS PERIOD)

El periodo de análisis es el tiempo total que cada estrategia de diseño debe cubrir. Es por tanto el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente. Puede ser igual que la vida útil, pero en casos en donde se prevén reconstrucciones o rehabilitaciones a lo largo del tiempo, el periodo de análisis comprende varios periodos de vida útil que son: el del pavimento original y el de las

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 3 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

distintas rehabilitaciones. La figura siguiente ilustra los conceptos expuestos de Periodo de Análisis y Periodos de Desempeño:

Periodos de análisis recomendados en la AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993 son los siguientes:

Tipo de Carretera	Periodo de análisis
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30 – 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20 – 50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15 – 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10 – 20 años

Otros valores de periodos de análisis recomendados se presentan a continuación:

Tipo de carretera	Periodo de análisis
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA 2001

La consideración de periodos largos es recomendable con la finalidad de evaluar y seleccionar alternativas de estrategias a largo plazo basado en análisis de ciclos de costo de vida. Por ejemplo, si la alternativa de un diseño de un pavimento requiere rehabilitación en el año 15 y la otra alternativa requiere una rehabilitación en el año 25, un periodo de análisis de 20 años no proveerá una comparación adecuada entre ambas alternativas, puesto que una de las alternativas incluirá los costos de rehabilitación mientras que la segunda no lo hará. En general, el periodo de análisis seleccionado deberá incluir al menos una actividad de

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 4 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

rehabilitación para cada alternativa. En el ejemplo un periodo apropiado de análisis podría ser 30 años o incluso 50 años dependiendo de la programación de las actividades de rehabilitación y de la importancia del proyecto. Proyectos más importantes o estratégicos tendrán periodos de análisis mayores.

1.3. PERIODOS DE VIDA ÚTIL RECOMENDADOS PARA PERÍODOS DE ANÁLISIS EXTENSOS

Para una selección adecuada del periodo de desempeño, el diseñador con base en la experiencia y las políticas de la Agencia de Transporte debe seleccionar los límites mínimos y máximos permisibles de la condición del pavimento. Así pues, debe tenerse claro que el periodo de desempeño máximo, es la cantidad máxima de tiempo que el usuario puede esperar de una etapa dada. Es decir, la experiencia puede indicar que los pavimentos diseñados originalmente para al menos 20 años podrían requerir de algún tipo de rehabilitación en los primeros 15 años posteriores a la construcción.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que la selección de periodos de desempeño o vida útil muy extensos puede conllevar a obtener diseños poco realistas. Por ello, si se considera un análisis de costos por ciclos de vida, es necesario tener en cuenta periodos máximos de desempeño que sean prácticos conforme al tipo de pavimento.

2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES EN LABORATORIO Y EVALUACIÓN EN CAMPO

Para la caracterización de materiales en los cuales se adiciona el cemento, comúnmente se realizan diferentes tipos de ensayos. Algunos de los ensayos más comunes utilizados se mencionan a continuación:

- **Resistencia a la compresión:** es probablemente la forma más viable para medir la resistencia de este tipo de materiales. La resistencia a la compresión inconfiada se obtiene dividiendo la máxima carga aplicada por el área de la sección transversal donde es aplicada la carga. Los ensayos de compresión inconfiada son típicamente desarrollados en un tiempo específico, dependiendo

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 5 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

de la preparación de la muestra y el tiempo de curado. En general, se ha encontrado que existe una relación entre la resistencia y el tiempo de curado.

- **Resistencia a la flexotracción:** los ensayos de flexión en vigas (flexo-tracción) y ensayos de tensión indirecta han sido usados para evaluar la resistencia a la tensión, la cual representa un parámetro crítico en la resistencia a la fatiga de estos materiales y en el diseño de pavimentos. El resultado de varios estudios ha indicado que la resistencia a flexión es de 10 a 30 por ciento de la resistencia a la compresión inconfiada.

El ensayo de tensión indirecta es el método más comúnmente aplicado para determinar la resistencia a la tensión. El ensayo consiste en la aplicación de una carga de compresión en forma constante a lo largo del plano diametral del espécimen hasta que se dé la fractura. La carga aplicada genera un esfuerzo uniforme de tensión perpendicular a lo largo del plano diametral, donde generalmente ocurre la fractura.

En el caso de los ensayos de flexión en vigas, se pueden aplicar dos procedimientos distintos: a) el procedimiento de carga en los tercios medios, o b) el procedimiento en carga en el punto central. El procedimiento de carga preferido para ensayos a flexión es el de carga en los tercios medios, ya que se obtiene un momento puro, con cortante igual a cero en el tercio central de la viga. La falla ocurre en el punto más débil dentro de la sección media de la viga. Por su parte, en el procedimiento de carga en el punto central, se obliga a la falla en la proximidad del punto de aplicación de la carga (punto de máximo momento flector), dando como resultado mayores resistencias aparentes.

- **Ensayos por fatiga:** La fatiga es el fenómeno de agrietamiento o fractura bajo esfuerzos repetitivos, con magnitudes menores a la resistencia por tensión del material. Los pavimentos construido con concreto hidráulico son susceptibles a la falla por fatiga dada la aplicación repetitiva de esfuerzos provocada por las cargas de tráfico. La fatiga en flexión es de gran interés por la relevancia de dicho tipo de deterioro en la falla funcional y/o estructural de pavimentos. En

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 6 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

general, el ensayo de flexión de vigas es el método más apropiado para examinar la resistencia al agrietamiento por fatiga.

3. MODELACIÓN EN PROGRAMAS DE COMPUTACIONALES PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MECANÍSTICOS PARA SU UTILIZACIÓN EN LA GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS EMPÍRICO-MECANICISTA DE COSTA RICA

El diseño de pavimentos rígidos requiere del uso de herramientas informáticas (software) para determinar las respuestas del pavimento (esfuerzos, deflexiones, deformaciones). El cálculo de dichas respuestas es usado habitualmente en Ecuaciones de Transferencia que pretenden determinar y predecir el desempeño de una estructura propuesta de pavimento.

El proceso de cálculo de las respuestas generalmente se hace a través de software basado en la Teoría de Placa. Sin embargo, en muchas ocasiones se requiere utilizar modelaciones no tradicionales, lo cual implica la necesidad de utilizar la Teoría de Elemento Finito.

Debido a lo anterior la correcta modelación de un pavimento de concreto requerirá de contar con datos de entrada adecuados, como.

- Propiedades de los materiales componentes.
- Calibración de ecuaciones de transferencia o modelos de falla.
- Modelación de los efectos climáticos sobre los materiales y la estructura del pavimento

En la primera categoría están las propiedades de los materiales requeridas para predecir los estados de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, dentro de la estructura del pavimento cuando está sometido a una carga externa de rueda. En el enfoque Mecanístico-Empírico, estas propiedades incluyen el módulo elástico (E) y la relación de Poisson (μ) del material. Estas propiedades son datos obligatorios para cada capa del pavimento dentro del sistema.

En un análisis mecanicista de respuesta del pavimento, el módulo elástico del concreto hidráulico tipo Portland (E_c), tiene un efecto importante en la deflexión del pavimento y los esfuerzos a través de la estructura del pavimento y debe ser tomado en cuenta

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 7 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

apropiadamente. La caracterización del módulo elástico del concreto hidráulico tipo Portland varía en función del tipo de diseño.

En esta investigación, se usará el software comercial ISLAB para determinar las respuestas de un pavimento de concreto ante diversos escenarios de propiedades de materiales, módulos de elasticidad de los diferentes materiales (concreto hidráulico, materiales granulares, suelos, etc.), características geométricas del pavimentos, propiedades del suelo subyacente, propiedades de dovelas y otros tipos de barras de amarre, ligaduras, interacción, espaciamiento, tamaño y transferencia de carga, entro otros parámetros. En la figura 3 se muestran la ubicación de los elementos y parámetros que serán considerados en los diversos escenarios a considerar.

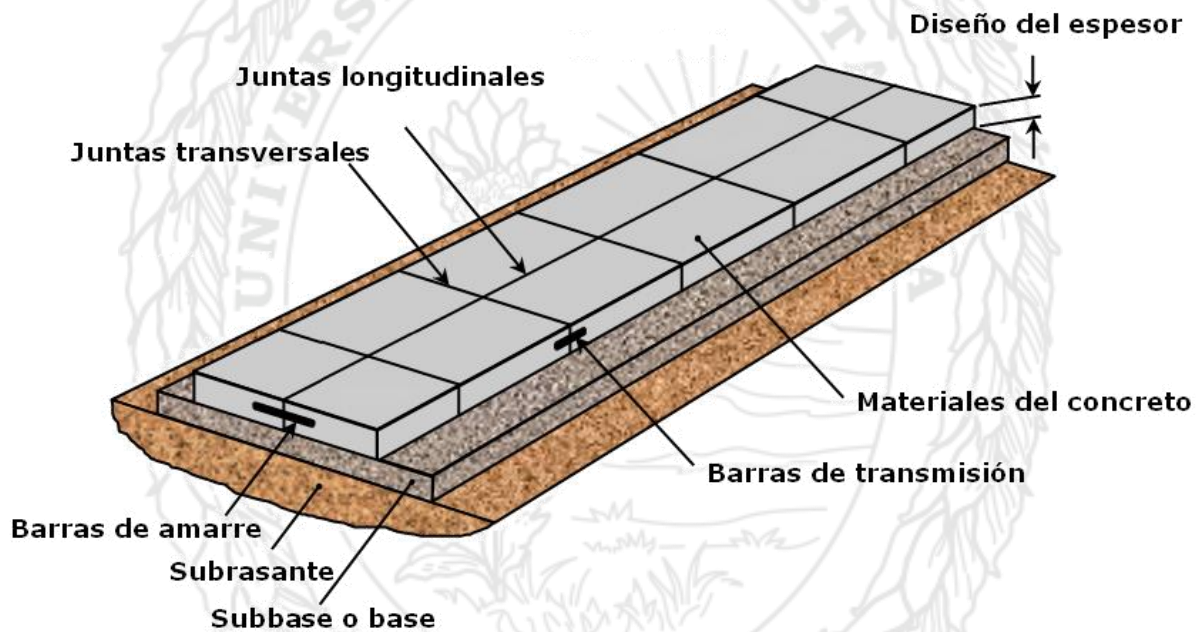


Figura 2. Elementos de un pavimento de concreto hidráulico

Para generar ecuaciones de regresión lineal múltiple que correlacionen las respuestas críticas con los diversos parámetros usados en la modelación. La regresión lineal múltiple es una técnica estadística para modelar e investigar la relación entre dos o más variables, descrita por una relación lineal entre la variable respuesta y las variables regresoras x_i . El modelo se utiliza para predecir futuras observaciones o para estimar la respuesta media para

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 8 de 13
-----------	---------------------------------------	----------------

un nivel particular de x_i . Por ejemplo, si se busca la relación que existe entre el esfuerzo en el eje x en el centro de una losa ($\sigma_{x \text{ centro}}$) con respecto a variables como el espesor de la losa de concreto, longitud de las dovelas, espaciamiento de la dovela, módulo elástico del concreto, módulo resiliente de la capa subyacente, separación de juntas transversales y longitudinales. Sería posible generar un modelo de regresión lineal múltiple que considere las variables:

Nombre de las variables	Valor de la variable
Y1	$\sigma_{x \text{ centro}}$
X1	Espesor de la losa
X2	Longitud de la dovela
X3	Espaciamiento de la dovela
X4	Módulo elástico del concreto
X5	Módulo resiliente de la capa subyacente
X6	Separación de juntas transversales
X7	Separación de juntas longitudinales
...
X_i	Parámetro o variable "i" a considerar en la regresión

Y cuya ecuación de regresión se puede expresar como:

$$Y1 = \beta_0 + \beta_1 \cdot X1 + \beta_2 \cdot X2 + \beta_3 \cdot X3 + \beta_4 \cdot X4 + \beta_5 \cdot X5 + \beta_6 \cdot X6 + \beta_7 \cdot X7 + \dots + \beta_i \cdot X_i$$

Donde el valor de los parámetros de regresión β_i se encuentran a través del método de mínimos cuadrados para el modelo de regresión lineal múltiple definido.

De esta manera se plantea la modelación de diferentes escenarios para la obtención de parámetros mecánicos para su utilización en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista de Costa Rica, en lo que se conoce en inglés como "*Closed Form Solutions*".

La modelación se realizará para un tráiler típico denominado como T3-S2, el cual posee 18 ruedas y dimensiones convencionales. Los límites de carga se asumirán que cumplen con

los rangos de carga máxima permitidos por la legislación de Pesos y Dimensiones en Costa Rica (ver Figura 3). Adicionalmente la modelación evaluará los puntos de carga críticos según la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista (ver Figuras 4 y 5).

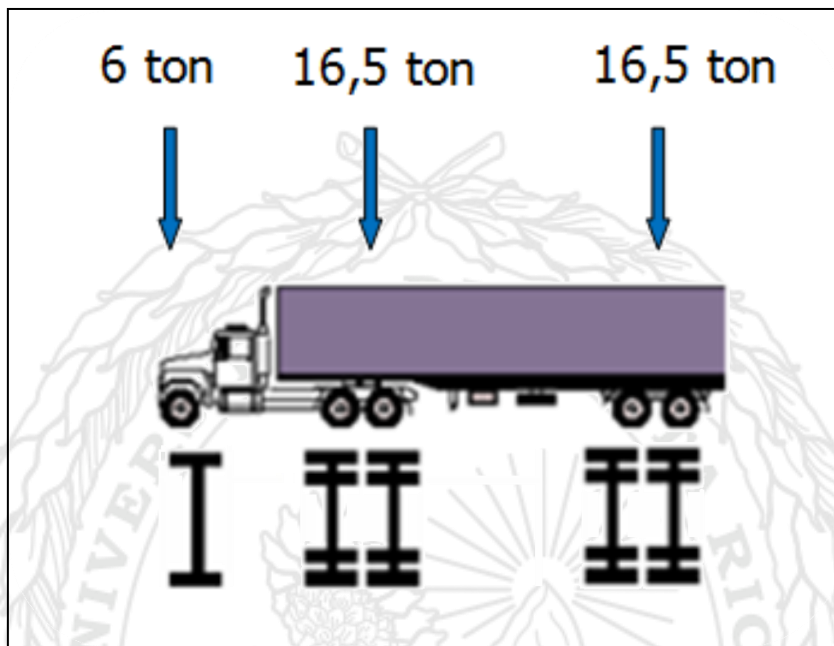


Figura 3. Configuración de llantas y cargas máximas permitidas para vehículo T3-S2

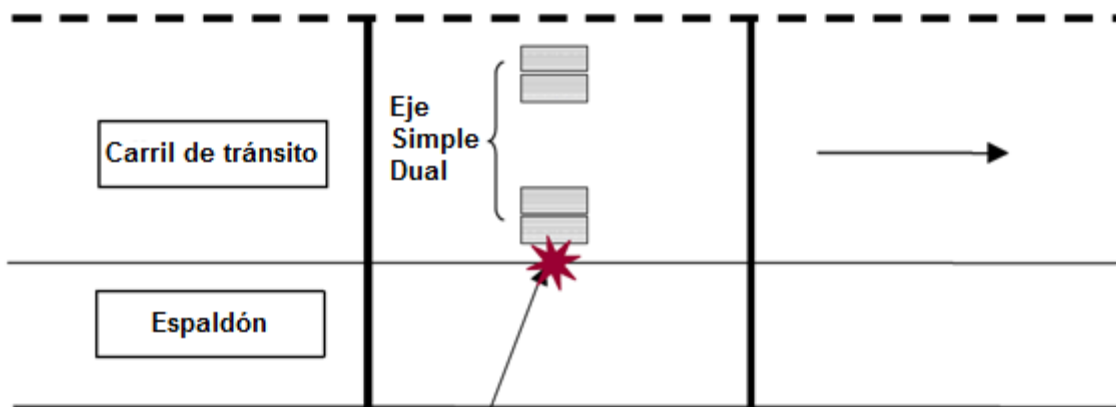


Figura 4. Criterio de falla de la Guía de Pavimentos Empírico-Mecanicista para agrietamientos de abajo hacia arriba.

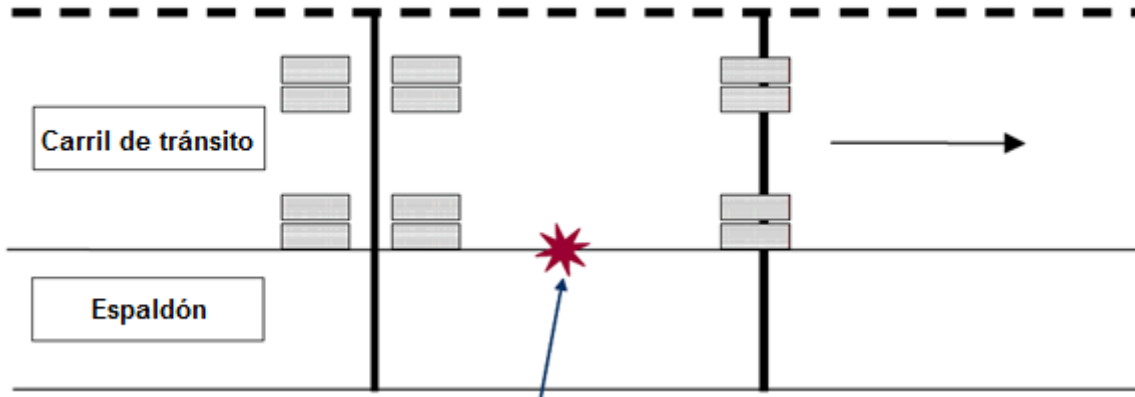


Figura 5. Criterio de falla de la Guía de Pavimentos Empírico-Mecanicista para agrietamientos de arriba hacia abajo.

En la Figura 6 se muestra una salida típica de un análisis realizado con el software ISLAB A la izquierda se muestran los esfuerzos en el eje "x" y los esfuerzos en el eje "y", por su parte a la derecha se observan las deflexiones obtenidas debido a la aplicación de las cargas del vehículo T3-S2.

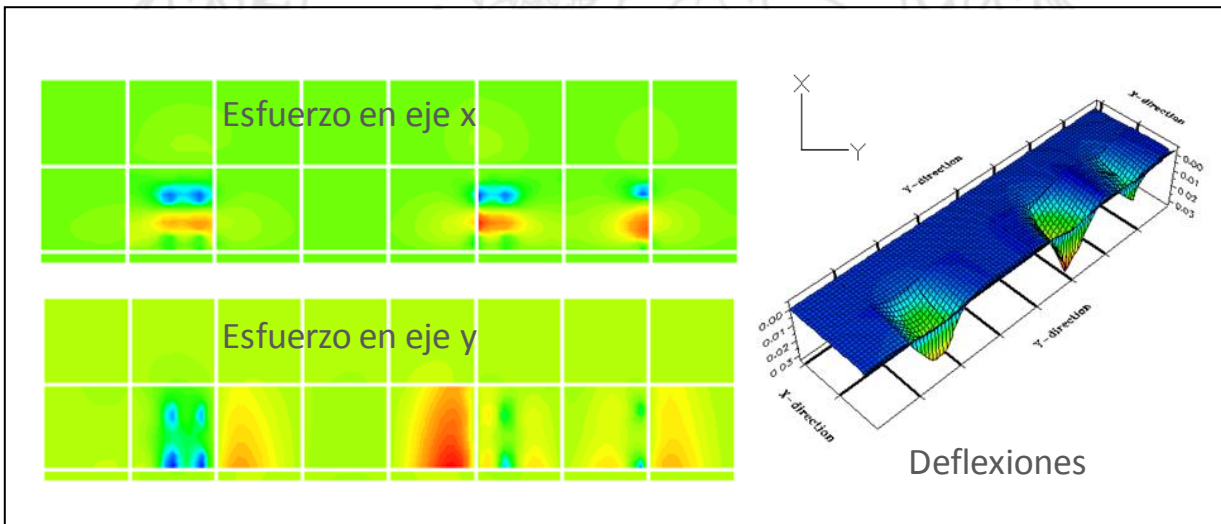


Figura 6. Ejemplo de una salida típica del software ISLAB

4. MATERIALES GRANULARES Y SUELOS ESTABILIZADOS CON CEMENTO

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 zona con niveles freáticos altos favorecen la aplicación de esta tecnología. En Costa Rica hay una amplia experiencia acumulada en este campo, al tratarse de una solución utilizada con bastante eficacia en los últimos 40 años, manteniéndose en buenas condiciones cuando existe un diseño adecuado de la base estabilizada y cuando existe un control en el proceso constructivo que garantice la homogeneización, compactación, curado y apertura al tráfico en el momento que el material haya alcanzado la resistencia esperada.¹

En teoría, se logra la estabilización de un material cuando al adiciona 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 bajos las condiciones climáticas a la que está expuesto el pavimento (Arce, 2011)²

De esta manera se está planteando la realización de un proyecto de investigación para la “Evaluación del desempeño de materiales tratados con cemento en tramos de prueba”, con la finalidad de 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. En este proyecto se determinará en el laboratorio la óptima combinación de agregado, agua, cemento y energía de compactación. Parámetros de mucha importancia para garantizar el mínimo costo y un exitoso desempeño de la base estabilizada y del pavimento, lo que conlleva también a la disminución del potencial de agrietamiento. Adicionalmente, con la construcción de tramos de pruebas se pretende evaluar los procedimientos constructivos y de control de calidad esenciales para lograr el cumplimiento dichos objetivos.

¹ *Notas del Foro sobre Bases Estabilizadas con Cemento. Realizado en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Agosto 2011.*

² *Arce, M. “Bases estabilizadas con cemento. Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes”. Boletín Técnico. Vol 2. N°19. Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA). San José. Costa Rica. Agosto 2011*

Propuesta	Fecha de emisión: 04 de marzo de 2013	Página 12 de 13
-----------	---------------------------------------	-----------------

En dicho proyecto se pretende incluir la realización de ensayos: *Resistencia a la compresión*, *Resistencia a la flexotracción* y *Ensayos por fatiga*, para la determinación de parámetros que puedan incluirse en análisis y diseño de la Guía de Diseño Mecanístico-Empírico de Pavimentos. En la figura 7 se presenta el esquema experimental a seguir, el cual incluye los ensayos de laboratorio y campo a realizarse.

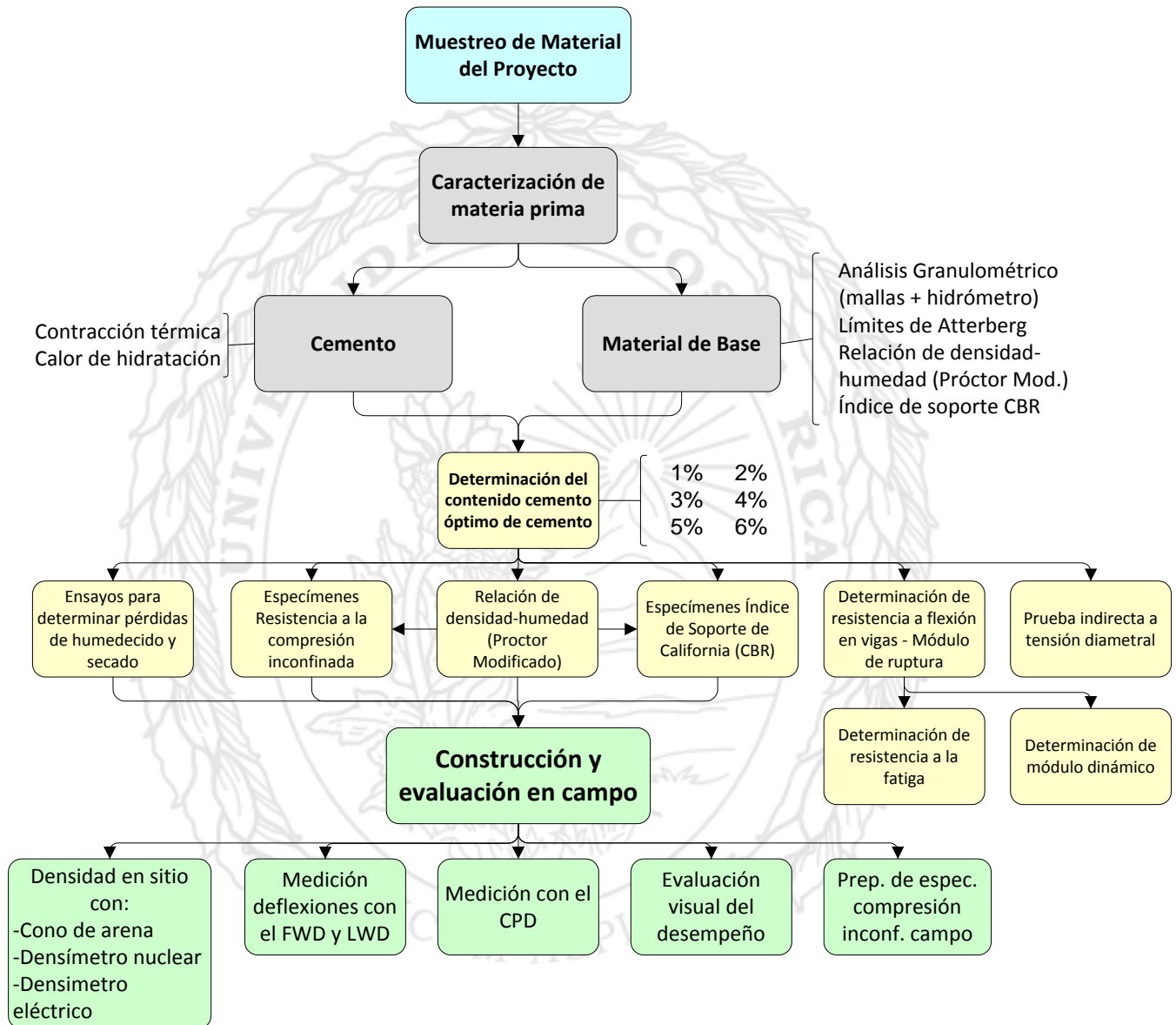


Figura 7. Esquema experimental propuesto del proyecto de investigación “Evaluación del desempeño de materiales tratados con cemento en tramos de prueba”