



# Evaluación del Comportamiento de la Fatiga de una Mezcla de Concreto MR-45 MPa con Adición de Polipropileno. Evaluation of Fatigue Behavior of Concrete Mix MR-45 MPa with Adicion to Polipropileno.

**Ing. Ana Luisa Elizondo Salas.**  
**Unidad de Desarrollo y Actualización de Especificaciones Técnicas**  
**PITRA-LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.**

**Sukti Monge Morales.**  
**Ingeniera Civil.**

**Ing. Luis Guillermo Loría.Ph.**  
**Cordinador General, Programa de Infraestructura y Transporte,**  
**PITRA- LanammeUCR, Universidad de Costa Rica**

**Ing. Alejandro Navas Carro. M.Sc.**  
**Director, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica**

**ana.elizondosalas@ucr.ac.cr , phone 2511-2541, fax 2511-4440**

## INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del  
artículo:

Recibido  
29-07-2013  
Aceptado  
15-11-2013  
Publicado  
20-12-2013

Palabras Claves:  
Fatiga  
Módulo de Rotura  
Polipropileno

## Resumen

---

Este artículo presenta los resultados obtenidos de un estudio realizado para elaborar un modelo de fatiga para un concreto hidráulico con adición de fibra de polipropileno. (Referencia Monge M, Sukti (2013)).

Considerando que el daño más común en los pavimentos es la fatiga causada por cargas repetitivas de vehículos, y que Costa Rica no cuantifica este daño, nace la necesidad de poner en práctica una prueba que permita a los diseñadores considerar la capacidad del material a la acción dinámica de los vehículos, para asegurar la vida útil para la que fue diseñado.

Para esto, se propuso una mezcla de hormigón hidráulico con módulo de ruptura de 4,5 MPa, típicos en Costa Rica, se determinó el porcentaje óptimo de la fibra de polipropileno, y se sometió a ensayo de fatiga, con el fin de obtener un modelo de la optimización del diseño y el análisis de rígido pavimentos. De los resultados obtenidos, donde se compara, bajo condiciones especificadas, hormigón convencional con hormigón con polipropileno, se concluye que este último tiene un mejor comportamiento a la fatiga, al menos para aplicaciones cercanas al esfuerzo a la rotura del material, y exhibe una mayor tenacidad pues su módulo de elasticidad disminuye. Por otra parte, la incorporación de polipropileno no reduce el espesor del elemento estructural, por lo que se debe considerar los costes asociados con su incorporación.

A pesar de que se estableció un modelo de de fatiga para las condiciones específicas dadas, es necesario que se depure y calibre haciendo más pruebas, con el fin de simular de manera más realista el comportamiento de los pavimentos rígidos en Costa Rica.



## INFORMACIÓN DEL ARTICULO

### Article history:

Received  
29-07-2013  
Accepted  
15-11-2013  
Available  
20-12-2013

Keywords:  
Fatigue  
Modulus of  
Rupture  
Polypropylene

## Abstract

---

This article presents the results of a study to develop a fatigue model for hydraulic concrete with polypropylene fiber addition. (Reference Monge M, Sukti (2013)).

Whereas the most common damage in pavements is fatigue caused by repetitive loading of vehicles, and that Costa Rica does not quantify this damage, comes the need to implement a test that allows the designers to consider the ability of the material vehicle dynamics to ensure the life for which it was designed.

For this, were proposed a hydraulic concrete mixture with modulus of rupture of 4,5 MPa typical in Costa Rica, it determines the optimal percentage of polypropylene fiber, which was subjected to fatigue testing in order to obtain a model optimizing the design and analysis of rigid pavements. From the results obtained, which compares, under specified conditions, conventional concrete with reinforced polypropylene, it is concluded that the latter has a better fatigue behavior, at least for applications near the stress at break of the material, and exhibits greater tenacity as its modulus of elasticity decreases. Moreover, the incorporation of polypropylene does not reduce the thickness of the structural element, so that one should consider the costs associated with their incorporation.

Although established fatigue model for the specific conditions given, it is necessary to debug and calibrate more testing, in order to more realistically simulate the behavior of rigid pavements in Costa Rica.

## 1. Introducción

### El problema específico

La capa de ruedo asfáltica (en concreto hidráulico o asfáltico), es el elemento del pavimento que debe resistir los efectos del tránsito, factores climáticos, deformaciones y agrietamientos sin perder su capacidad estructural. Un tipo de deterioro usual que se presenta en los pavimentos es el agrietamiento por fatiga, el cual se produce cuando éstos se someten a cargas repetitivas de tránsito, sin embargo en nuestro país no se realizan pruebas para cuantificar el daño por fatiga, por lo que surge la necesidad de implementar un ensayo que permita al diseñador de pavimentos tomar en cuenta la capacidad del material frente a la acción dinámica de los vehículos.

A nivel mundial se emplean distintos modelos de fatiga para el diseño de pavimentos rígidos como lo son el modelo incluido en la MEPDG (Mechanistic empirical Pavement Design Guide) de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), el modelo PCA (Portland Cement Association), el modelo de cero mantenimiento (Federal Highway Administration) y el modelo calibrado mecanicista (US Army Corps of Engineers); estos modelos fueron calibrados bajo condiciones distintas a las que se presentan en el país, por lo que resulta evidente la necesidad de crear un modelo que refleje las características reales de los materiales utilizados en Costa Rica.

Por otro lado, para optimizar el diseño de pavimentos normalmente se busca reducir el espesor de las capas que lo conforman, sin comprometer la capacidad estructural del elemento, pues esto implica una disminución en los costos. En este sentido, en la última década se ha incrementado el uso de fibras no estructurales para modificar el concreto y lograr reducir el espesor de las losas de pavimento, sin embargo el tema no ha sido investigado ampliamente y se requiere estudiar el comportamiento mecánico de ambos materiales para su uso.

Debido al vacío existente en cuanto a la inclusión de la fatiga en la vida útil del pavimento, en este proyecto de investigación, se pretende desarrollar una herramienta para evaluar el desempeño de los pavimentos rígidos a largo plazo y de esta manera mejorar la calidad de la infraestructura vial del país.

### Importancia

Nuestro país se encuentra en vías de desarrollo, y por tanto es de suma importancia que la infraestructura de caminos se encuentre en óptimas condiciones de operación para lograr movilizar la mayor cantidad de productos, mercancías y personas, por medio de la red vial de una manera eficiente. Es así como, este proyecto

contribuirá al mejoramiento del diseño de pavimentos rígidos en el país, lo cual representa una ventaja a largo plazo pues al incorporar conocimientos en materia de fatiga se puede asegurar la vida útil de los pavimentos a nivel nacional y sentar un precedente para iniciar la investigación en otros materiales utilizados en pavimentos como lo son las bases estabilizadas, comúnmente utilizadas para la construcción de carreteras con pavimento asfáltico.

Algunos autores han señalado que el uso de fibras sintéticas en el concreto asfáltico resulta beneficioso para incrementar la resistencia a la fatiga, ya que las fibras incrementan la capacidad a flexión de la mezcla y contribuyen a una mayor duración del concreto. (Pujadas, 2009; Mendoza, Aire y Dávila, 2011). El propósito de este proyecto consiste precisamente, en incorporar los beneficios brindados por la tecnología de los polímeros en los pavimentos rígidos con el fin de mejorar su desempeño, así como reducir los costos de construcción y mantenimiento de las carreteras.

Los resultados generados a partir de la calibración del modelo de fatiga serán tomados por el LanammeUCR para impulsar la creación de una ley de fatiga del concreto en Costa Rica que sirva de insumo para regular la construcción de los pavimentos rígidos construidos en el país.

### Antecedentes

En las últimas décadas se ha popularizado el uso de fibras sintéticas en el concreto como lo son el polipropileno, el poliestireno y la fibra de vidrio. Varios estudios al respecto son:

US Army Corps of Engineering, el American Concrete Institute y la American Society for Testing Materials, (Pujadas, 2009): están estudiando el comportamiento del concreto modificado con fibras como material de construcción quienes han publicado normas y métodos de experimentación al respecto.

State of the art report on fiber reinforced concrete del American Concrete Institute (ACI), Estados Unidos: contiene una revisión de las fibras utilizadas en el concreto, incluyendo el polipropileno, donde se realiza una descripción de diversos tipos de fibras, cómo dosificarlas, comparación de propiedades físicas, posibles aplicaciones y algunas consideraciones de diseño. Sugiere el uso de fibras para el control de agrietamiento en hormigón reforzado. Durability of polypropylene fibre reinforced concrete. España (Pujadas, 2009): analizó la influencia que tiene la adición de fibras de polipropileno en el control de fisuración del concreto. Indica que “La incorporación de fibras al hormigón mejora la respuesta frente a la fisuración y reduce su fragilidad, al mismo tiempo que gana tenacidad, resultando adecuado para sobrellevar acciones dinámicas o prevenir situaciones donde se requiera el control de los procesos de fisuración. El incremento de resistencia a la fatiga, resist-

encia al impacto y reducción de la permeabilidad, contribuyen a una mayor duración del hormigón beneficiando a largo plazo los costos asociados por mantenimiento”.

Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5 MPa para pavimento con fibras plásticas, Colombia Boada y Pérez (2010): evaluaron el comportamiento del concreto con tres tipos de fibras plásticas: polipropileno, caucho y tiras de bolsas de leche en diferentes porcentajes de adición. Se realizaron ensayos estáticos a probetas de concreto donde se observó una reducción en la capacidad a compresión de las mezclas con fibras, mientras que la resistencia a flexión aumentó con respecto a la mezcla de control. Estas tendencias se mantuvieron constantes para los tres polímeros, lo cual sugiere que el concreto con fibras resultó ser más dúctil que el concreto sin fibras.

Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno, Costa Rica, Koss (2001): estudió el concreto reforzado con fibras de polipropileno. “La ganancia en  $f'c$  debido a las fibras no es significativa, por lo que se puede afirmar que no contribuyen de manera apreciable al incremento de la resistencia a la compresión del concreto” (Koss, 2001). Además, se obtuvo un módulo de ruptura mayor para las vigas con contenido de fibras. En la misma investigación se intentó incorporar el concepto de fatiga mediante la falla de losas de concreto sometidas a cargas de impacto. Se montó un ensayo básico empleando una polea y un peso para golpear las losas y se procedió a contar el número de golpes necesarios para llegar a la falla. Los elementos con fibras de polipropileno se mostraron más resistentes al impacto.

Diseño Experimental de un Concreto Reforzado con Fibras de Vidrio para Uso en Losas de Pavimento, Costa Rica, Sánchez (1985): realizó un informe de concreto reforzado con fibras de vidrio para uso en losas de pavimento. encontró que la adición de fibras resulta ventajosa para los pavimentos, pues aún cuando se pierde resistencia a la compresión se incrementa la capacidad a flexión de la losa.

Los estudios realizados con respecto a la implementación de ensayos referenciados a una norma de fatiga en el concreto son escasos. Se tiene por ejemplo el estudio Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results Estados Unidos, Rao y Roesler (2005), donde compilaron en un documento los principales modelos de fatiga que se utilizan actualmente para el diseño de pavimentos. Se incluye cómo está definida la falla por fatiga según el modelo y el punto de la losa donde se calcularon los esfuerzos que generaron las ecuaciones de las curvas de fatiga.

Existe una publicación en la cual se desarrollan los procedimientos para ejecutar pruebas de módulo y fatiga en materiales cementados (para bases estabilizadas) realizada por Austroads (Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities). Ambos ensayos se llevaron a cabo mediante la aplicación de carga en los tercios medios de vigas. A pesar de que el suelo y el concreto son

materiales con comportamientos mecánicos distintos, se tomaron en cuenta las recomendaciones de este informe como guía para la implementación del ensayo de módulo dinámico y de fatiga (consideraciones para el montaje del ensayo, porcentaje de carga aplicada, entre otros).

### Objetivos del estudio

Considerando la problemática anterior, este estudio tienen la finalidad de evaluar el comportamiento a fatiga de una mezcla de concreto hidráulico con MR-4,5 MPa para pavimento, con adición de fibras de polipropileno. Para ello, se propone:

Determinar las propiedades de resistencia mecánica de una mezcla de concreto hidráulico MR-4,5 MPa, con adición de fibras de polipropileno.

Implementar en el LanammeUCR un ensayo de fatiga para concreto hidráulico MR-4,5 MPa, con adición de fibras de polipropileno. Elaborar un modelo de fatiga para el concreto hidráulico MR-4,5 MPa, con adición de fibras de polipropileno propio para Costa Rica. Realizar un diseño mecanicista del concreto hidráulico MR-4,5 MPa, a partir del modelo de fatiga.

### Alcances y Limitaciones

Para la definición de la metodología de investigación, para establecer el alcance de la investigación, se consideraron los siguientes aspectos.

Los resultados del proyecto aplican solamente al diseño de mezcla y agregados utilizados y se refieren a un solo tipo de fibras de polipropileno (FibroMac 12) en tres dosificaciones distintas (0,1%, 0,2% y 0,3% del volumen de total de concreto). La investigación se enfocó meramente en el trabajo de laboratorio, no se buscaron correlaciones de los resultados con trabajo de campo.

El análisis de varianza de los resultados se realizó mediante pruebas ANOVA. La implementación de los ensayos de módulo dinámico y fatiga en el concreto se realizó siguiendo las recomendaciones del informe Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials, de Austroads (2012).

En el diseño del pavimento rígido se consideran propiedades de materiales típicos de Costa Rica y los datos de la encuesta de carga realizada por el LanammeUCR para la Ruta 01 (sentido Cañas-San José) para un periodo de diseño de 20 años.

Se utilizó la metodología AASHTO 93 para el diseño de pavimento rígido y para la revisión por fatiga del concreto MR-4,5 MPa se utilizó el software ISLAB 2000.

Durante la revisión por fatiga del diseño mecanicista se tomó en cuenta un camión de diseño únicamente.

No se consideró el análisis económico del tipo costo-beneficio para determinar la factibilidad de uso de las fibras de polipropileno en el concreto para pavimento.

De igual forma, se consideraron las siguientes limitaciones para el desarrollo de este estudio:

Las pruebas de laboratorio realizadas dependieron de la disponibilidad de los equipos del LanammeUCR.

El personal técnico del LanammeUCR no tenía experiencia previa con ensayos de módulo dinámico o de fatiga en el concreto.

No se tiene certeza del comportamiento del concreto modificado con fibras, especialmente en cuanto a las variaciones con respecto a la resistencia a la compresión y a la flexión. La información de estudios previos realizados es contradictoria.

Todos los especímenes de los diferentes tratamientos debieron ser fabricados en coladas distintas debido a la capacidad máxima de la batidora y a la utilización de diferentes porcentajes de adición de fibra.

No fue posible verificar las mediciones de deformación registradas por las galgas extensométricas con las deflexiones en las vigas durante la falla para los ensayos de módulo dinámico.

Para el modelado del pavimento con el software de elemento finito no se considera el análisis por temperatura, ni variaciones en el comportamiento de la estructura del pavimento debido a las condiciones climáticas, ya que no se cuenta con datos fidedignos para realizar el análisis.

## Metodología de investigación

Se siguieron tres etapas principales:

### Fase teórica

Estudio y revisión de la información existente acerca del comportamiento mecánico del concreto modificado con fibras sintéticas y de la implementación de ensayos de fatiga en el concreto con y sin adición de fibras. La información se recopiló principalmente en trabajos finales de graduación, publicaciones en línea, documentos oficiales del organismos internacionales y en las normas de la American Society for Testing Materials (ASTM).

### Fase experimental

Se caracterizaron los agregados y el cemento con los que se elaboraron las probetas de concreto para los ensayos estáticos y dinámicos.

Se siguieron los lineamientos indicados por las norma ASTM C33/C33M (Standard Specification for Concrete Aggregates) para los ensayos del agregado, tanto para el fino como para el grueso. La caracterización del agregado fino incluyó las siguientes pruebas.

Para caracterizar el cemento que se utilizó en las mezclas de concreto se realizaron las siguientes pruebas:

Método de Ensayo Normalizado para la Consistencia Normal de un Cemento

Hidráulico (ASTM C187)

Método de Ensayo Normalizado para el Tiempo de Fragua de un Cemento (ASTM C191)

Método de Ensayo Normalizado para la Gravedad Específica de un Cemento Hidráulico (ASTM C188)

Método de Ensayo Normalizado para la Resistencia a Compresión de un Cemento Hidráulico (ASTM C305, ASTM C1437 y ASTM C109)

Con el fin de realizar los ensayos estáticos se fabricó una mezcla control según el diseño de mezcla y luego se realizaron otras tres mezclas con valores de adición de fibras de polipropileno distintos. Se fallaron tres especímenes a 7 días y otros tres a 28 días, por cada tipo de mezcla para cada uno de los ensayos. Se realizaron los siguientes ensayos para todos los tratamientos:

Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39).

Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a Flexión en Vigas de Concreto (ASTM C78).

Método Estándar de Ensayo para Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson del Concreto (ASTM C469).

Apartir de los resultados obtenidos en los ensayos estáticos se escogió el porcentaje de adición de fibra de polipropileno óptimo para el concreto y con este porcentaje se continuó trabajando para efectuar los ensayos dinámicos.

Módulo dinámico del concreto

Fatiga en vigas de concreto

Estos ensayos se realizaron tomando como referencia el informe de Austroads (2012) Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials. Los ensayos dinámicos para concreto se implementaron por primera vez en el LanammeUCR, de ahí que se dio la necesidad de efectuar pruebas previas para calibrar el ensayo a la carga y frecuencia correcta. Con los resultados de los ensayos estáticos y dinámicos se calibró un modelo de fatiga para Costa Rica, que contempla las características de los agregados, el cemento y de las fibras de polipropileno

utilizados en la mezcla de concreto. Se obtuvo una curva donde se grafica el número de repeticiones de carga permisibles para que ocurra la falla por fatiga contra una razón del esfuerzo aplicado.

### Fase analítica

Una vez obtenido el modelo de fatiga se realizó un diseño mecánico utilizando el software ISLAB2000, por medio del cual se cal-

culan los esfuerzos y deformaciones de una losa de pavimento con secciones típicas aplicando las cargas de diseño deseadas.

Finalmente, se tomaron todos los resultados obtenidos en las diferentes fases del proyecto y se analizaron con base en los objetivos planteados. De esta manera se llegó a las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

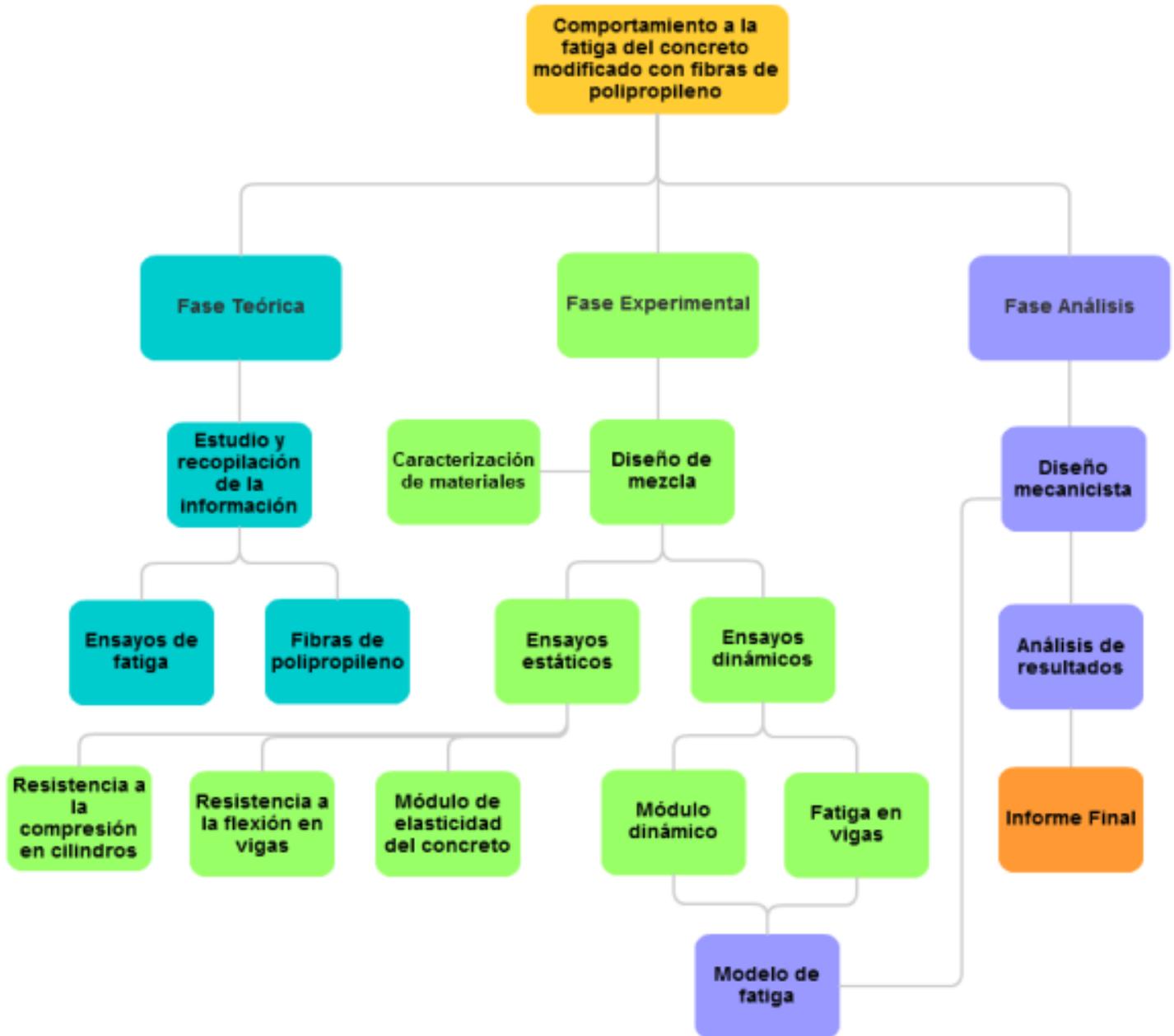


Figura 1 Metodología de Trabajo

## 2. Marco Teórico

### Generalidades del pavimento rígido

La principal ventaja que ofrece el concreto hidráulico frente a los pavimentos bituminosos es que distribuye de mejor manera las cargas verticales hacia la estructura del pavimento. Dicha estructura está conformada por la losa y la base, que a su vez se apoya sobre la subrasante. Las estructuras de concreto son mucho más rígidas que las de asfalto, además pueden llevar acero en las juntas, el cual contribuye a controlar las deformaciones en toda la estructura, mientras que favorece la transferencia de carga. En caso de que las losas no posean dovelas o juntas transversales, la transferencia de carga se da mediante la fricción del agregado.

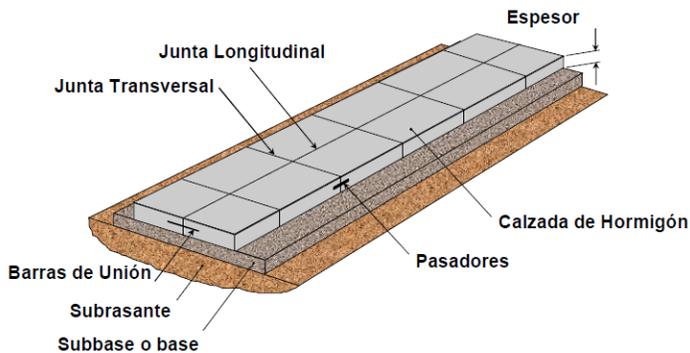


Figura 2. Sección de pavimento  
 Fuente: Calo, 2010

### Diseño de pavimentos rígidos

Para en diseño de pavimentos, ya sean rígidos o flexibles, la tendencia en Costa Rica ha sido utilizar la Metodología AASHTO 93. En el caso de pavimentos hidráulicos se requiere de algunos parámetros de diseño como el módulo de reacción de la estructura, el módulo de elasticidad del concreto, el módulo de ruptura del concreto, el coeficiente de transferencia de carga, el coeficiente de drenaje, la serviciabilidad, nivel de confianza y número de ejes equivalentes para obtener finalmente un espesor de losa adecuado para soportar las cargas de diseño. Se trata de una metodología empírica que evalúa el desempeño del pavimento en función de las deformaciones de la subrasante utilizando la teoría de la elasticidad. Mediante varias pruebas se determinaron correlaciones entre el comportamiento del pavimento y las cargas aplicadas; se evaluó la respuesta de diferentes materiales con características conocidas al ir variando el número de repeticiones de ejes, magnitud de la carga, espesores del pavimento, entre otros: estos estudios permitieron la publicación de la primer "Guía AASHO para Diseño de Pavimentos Rígidos y Flexibles" en 1961, lo que llegó a convertirse con los años en el método de diseño AASHTO 93.

La PCA propuso en 1984 un método de diseño mecanístico-empírico, exclusivo para pavimentos de concreto. "Tiene como base el conocimiento de varias teorías de pavimentos como Westergard, Picket y Ray. Incorpora la experiencia en el comportamiento de varias pruebas e investigaciones como la Arlington Test y diversos proyectos de la misma PCA. Parte del método fue desarrollado interpretando los resultados del modelo de elementos finitos basados en el comportamiento de una losa de espesor variable y dimensiones finitas (180 x 144 pulgadas) a la cual se le aplicaron cargas al centro, de borde y de esquina, considerando diferentes condiciones de apoyo y soporte" (Vega, 2012).

Los factores de diseño que se requieren en el procedimiento de diseño son el módulo de ruptura de concreto, el módulo de reacción, el periodo de diseño, las frecuencias y encuesta de carga de los camiones (no toma en cuenta vehículos livianos). El método de la PCA no considera la serviciabilidad inicial ni la final.

A diferencia del método AASHTO 93, el método de diseño de la PCA considera dos criterios de falla, la falla por erosión y la falla por fatiga. Se establece que un pavimento puede llegar a fallar por erosión de la subbase cuando se presentan diferencias de elevaciones en las juntas y bombeo excesivo que va formando huecos bajo la losa. El análisis del criterio de fatiga es utilizado para evaluar los esfuerzos producidos en las losas del pavimento ante la aplicación de cargas (Corjeno y Velásquez, 2009).

### Metodología de diseño mecanístico-empírica

En el año 2002, AASHTO publicó una guía de diseño mecanístico-empírica MEPDG (Mechanistic empirical Pavement Design Guide) que permite considerar en el diseño la heterogeneidad de los materiales que conforman la estructura del pavimento y de esta manera calcular la respuesta de toda la estructura.

La guía MEPDG incorpora la experiencia adquirida mediante métodos empíricos, requiere de parámetros y datos específicos para cada proyecto, que pueden ser obtenidos mediante pruebas de laboratorio o en campo por medio de ensayos destructivos y no destructivos.

Para el diseño se toman en cuenta las condiciones del sitio y se propone un diseño que cumpla con los criterios de evaluación tanto estructurales como de servicio. Esta metodología todavía no se ha utilizado en Costa Rica pues no se ha calibrado para los materiales que se encuentran en el país. Sin embargo en esta investigación se realiza un diseño mecanicista al que se le incorpora el modelo de deterioro por fatiga, obtenidos mediante los ensayos de laboratorio realizados.

## Fatiga del concreto

La falla por fatiga ocurre ante la acción repetitiva de cargas dinámicas sobre el concreto, causando esfuerzos que forman microfisuras en el material y que luego lo llevan a la ruptura. Entre los factores que afectan la fatiga en los pavimentos hidráulicos se encuentran el número de aplicaciones de carga, la resistencia y módulo de ruptura, el espesor de la losa de concreto, el espaciamiento entre juntas transversales, apoyo en el borde de las losas, apoyo de la subrasante, aditivos, tiempo de curado y edad del concreto. (Anguas, Gómez y Sesma, 2002)

La fatiga en el concreto puede causar tanto agrietamientos transversales como longitudinales. Usualmente las grietas transversales inician en la orilla del pavimento en medio de las juntas transversales, hasta proyectarse hasta la otra margen; mientras que los agrietamientos longitudinales se dan en medio de las huellas de los vehículos.

“Experimentalmente se ha definido la fatiga como el número de ciclos necesarios para que el módulo de elasticidad inicial del material se disminuya en un 50% al aplicarse carga dinámica sobre una viga sometida a flexión. Por lo tanto, la vida de fatiga se define como el número de ciclos aplicados al espécimen para reducir su módulo en un 50%, durante el ensayo de fatiga”. (Austroads, 2012) Este criterio también se utiliza para pavimentos flexibles y una de las principales ventajas de su aplicación es la reducción del tiempo de ejecución de la prueba, pues para ciertas frecuencias de aplicación y cargas bajas el ensayo podría extenderse por días.

## Relación de esfuerzos

El número de ciclos de carga y descarga que un concreto puede llegar a resistir antes de la falla depende del nivel de esfuerzos aplicado.

La relación de esfuerzos experimentada por un pavimento de hormigón se ha relacionado con el logaritmo de la cantidad de aplicaciones de carga necesarias para producir la falla por fatiga, donde la relación de esfuerzos SR, es la relación entre el esfuerzo máximo aplicado a la losa y el módulo de ruptura del concreto. (Rao y Roesler, 2005)

(1)

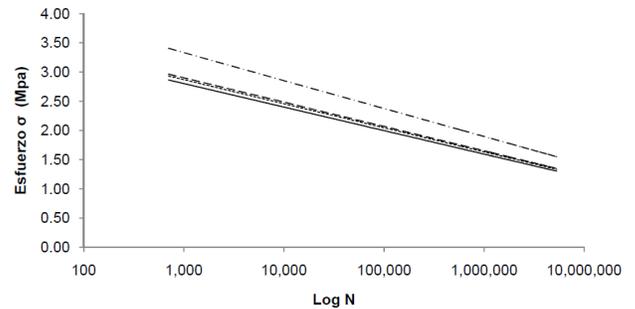


Figura 3 Modelo de fatiga Fuente: Boada y Pérez, 2010

El esfuerzo de tensión máximo que se alcanza en la fibra extrema sometida a tensión se conoce como módulo de ruptura del concreto. El módulo de ruptura se obtiene mediante ensayos de resistencia a la flexión a 28 días en los tercios medios de la viga, aunque también se puede realizar el ensayo cargando la viga en su punto central. En ensayo consiste en someter la viga a flexión pura y registrar la carga máxima que soportó el elemento antes de fallar.

El valor del módulo de ruptura depende de las dimensiones de la viga y de la ubicación de las cargas. Normalmente las grietas aparecen en el tercio central y se puede calcular el módulo de ruptura como se muestra a continuación.

(2)

Si la falla ocurre fuera del tercio medio de la viga y lo sobrepasa en más de un 5% entonces se debe aplicar la siguiente ecuación.

(3)

donde,

- MR= Módulo de ruptura (MPa)
- P=carga máxima aplicada a la viga (N)
- L=longitud del claro (mm)
- b=ancho promedio en la cara fracturada (mm)
- d=profundidad promedio en la cara fracturada (mm)
- a=distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga (mm)n

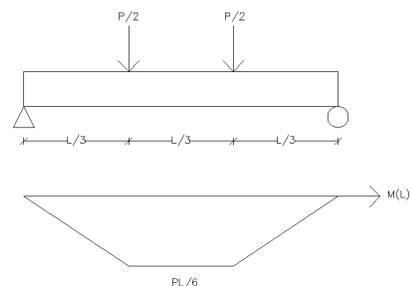


Figura 4 Diagrama de momentos de viga sometida a flexión pura

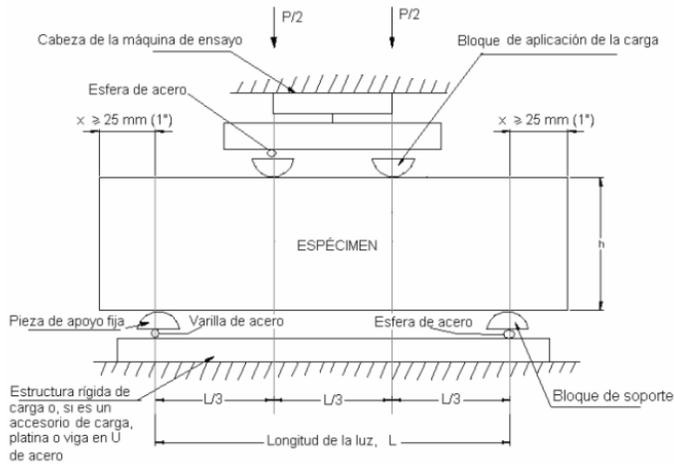


Figura 5. Montaje del ensayo de flexión (ASTM C 78) Fuente: INV E-414-07, 2007

El ACI 318-05 proporciona un modelo que relaciona el módulo de ruptura con la resistencia a la compresión a partir de un factor  $k$  que debe ser calibrado para cada mezcla, donde se establece que el módulo de ruptura es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión de la mezcla.

**(4)**

El factor  $k$  podría resultar útil; ya que al conocer su valor aproximado se puede simplificar el diseño de mezcla. Es factible diseñar siguiendo la metodología del ACI-211 y de esta manera diseñar para la resistencia a la compresión que permita obtener el módulo de ruptura deseado.

El esfuerzo aplicado se calcula a partir de la carga máxima que fue aplicada a la viga durante el ensayo y la sección del elemento.

**(5)**

donde,

$$M = \text{Momento máximo (kg cm)}$$

$$S = \text{Módulo de sección (cm}^3\text{)}$$

Finalmente puede obtenerse la relación de esfuerzos  $SR$  siguiendo la Ecuación 1.

**Repeticiones de carga**

A continuación se detallará como se obtiene la cantidad de aplicaciones de carga necesarias para producir la falla por fatiga, es decir el número de repeticiones de carga  $N$ .

El orden de aplicaciones de carga tiene un efecto significativo sobre el valor final del daño por fatiga; o sea que el número total de ciclos de carga aplicados está influenciado por la secuencia de aplicación. (Anguas et al, 2002).

En el reporte técnico "Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials" se definen las variables que deben tomarse en cuenta para el montaje del ensayo de fatiga. El ensayo de fatiga consiste en la aplicación de pulsos de carga cíclica haversiana, es decir ciclos donde el pico negativo de la onda es cero.

Quando los vehículos transitan sobre la estructura de pavimento, someten las losas a esfuerzos de tensión, más no ocurre el efecto contrario, no hay compresión en las losas por causa del tránsito vehicular y por esto la carga debe aplicarse solamente en un sentido. Los pulsos de carga haversiana permiten simular el efecto de las cargas de tránsito sobre las losas de hormigón.

Durante el ensayo de fatiga se recomienda aplicar entre el 60% y el 90% de la carga de rotura por flexión determinada previamente, a una frecuencia de 2 Hz. Cuando se presenta el tránsito de vehículos sobre las losas de concreto, las cargas llevan al material a comportarse dentro del rango lineal elástico, lo que implica que su comportamiento no depende de la frecuencia de aplicación de la carga, como es el caso de los pavimentos flexibles. En el ensayo se adopta una frecuencia que pueda ser programada exitosamente en la máquina de carga y que sea lo suficientemente rápida para fracturar el material dentro de un tiempo razonable.

Luego de llevar la viga a la falla puede conocerse el número de ciclos requeridos para producir la falla por fatiga y finalmente obtener la curva de fatiga.

**Modelos de fatiga**

Los modelos mecanicistas de fatiga utilizan el concepto de daño acumulado en la losa para determinar la falla por fatiga. La ecuación de daño acumulado fue publicada por Miner (citado por Rao y Roesler, 2005) y ha sido ampliamente utilizada para la evaluación y diseño de pavimentos.

La fatiga del concreto depende de varios factores, incluyendo la magnitud y posición de las cargas que producen los esfuerzos críticos; el concepto de daño acumulado permite contemplar la suma del daño por fatiga causado por cargas de distinta magnitud y aplicadas bajo condiciones variables, sin embargo asume que el daño se incrementa linealmente. La siguiente ecuación se conoce como Ley de Miner.

**[6]**

donde,

$$n_i = \text{Número de repeticiones de carga aplicadas bajo la condición } i$$

$$N_i = \text{Número de repeticiones de carga permisibles hasta la falla por fatiga bajo la condición } i$$

De acuerdo con la Ley de Miner, los materiales deberían fallar cuando el daño por fatiga sea igual a la unidad, sin embargo debido a la variabilidad del concreto y a los diversos factores que rigen la falla por fatiga, la fractura puede presentarse para valores menores o mayores que uno.

Se han desarrollado diversas curvas de fatiga para pavimento rígido, a partir de datos obtenidos en campo y laboratorio. Las curvas relacionan la relación de esfuerzos con las repeticiones de carga hasta la fractura. Tales como: -CERO MANTENIMIENTO de la Federal Highway Administration, -PCA de la Asociación del Cemento Portland, -CALIBRADO MECANICISTA que se basa en datos recolectados en las pruebas del Cuerpo de Ingenieros (COE) y AASHO Road Test, -FOXWORTHY, que se basa en datos recolectados por el Cuerpo de Ingeniero (COE), -ERES/COE que se basa en datos recolectados por el Cuerpo de Ingeniero, -ARE, Austin Research Engineers, que se utiliza los resultados de las pruebas de AASHO Road Test, -RISC que se obtiene del análisis de datos de las pruebas AASHO, y -VESIC que utiliza los datos de las pruebas de AASHO y los analiza mediante teoría de placa de Westergaard.

### Fibras de polipropileno

En el informe del ACI State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete (2002) se reporta el uso de fibras sintéticas como material de construcción por primera vez en 1965. El U.S. Army Corps of Engineers (USACE) utilizó fibras sintéticas durante la construcción de estructuras resistentes contra explosiones y se mostró que al incorporar las fibras en el concreto, se formaba una mezcla de mayor ductilidad y resistencia al impacto.

Las fibras utilizadas para concreto se clasifican generalmente, según su diámetro en microfibras o macrofibras. Según Xargay y Balzamo (2010), el límite convencional que distingue las microfibras de las macrofibras está dado por el diámetro equivalente de 0,3 mm. Las fibras de polipropileno se clasifican como microfibras y no poseen aporte estructural dentro de la matriz de concreto. Su longitud puede oscilar entre 7 mm y 65 mm. A continuación se presenta un cuadro que resume algunas de las principales características de cinco tipos de fibras sintéticas.

Tipo de fibra	Resistencia a la tensión (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad *10 <sup>-3</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	Elongación última (%)	Gravedad Específica	Absorción de agua ASTM D570 (% peso)
Acrílica	2700-10200	140-196	7.5-50	1.16-1.18	1.0-2.5
Nylon	10000	52	20	1.14	2.8-5.0
Poliéster	2300-11200	175	12-150	1.34-1.39	0.4
Poliétileno	750-6000	50	Mar-80	0.92-0.96	-
Polipropileno	1400-7000	35-50	15	0.90-0.91	-

Cuadro 1. Comparación entre fibras plásticas Fuente: ACI 544.1R, 2002 (Modificado por autor, 2012)

El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel (IMCYC, 2007). El punto de fusión y el módulo de elasticidad de este tipo de fibras son bajos en comparación con otros tipos de fibras sintéticas, sin embargo una gran ventaja que ofrecen es su comportamiento ante la exposición al fuego. A altas temperaturas la fibra desaparece y provee canales de alivio dentro de la estructura, por donde puede escapar el vapor, reduciendo los daños.

La protección pasiva del concreto contra el fuego es uno de los principales beneficios que aporta la incorporación de fibras de polipropileno. "En el momento que las temperaturas superficiales del hormigón empiezan a incrementar, la mayoría del vapor de agua que se encuentra dentro del hormigón intenta dirigirse al interior donde las temperaturas son menores, este fenómeno trae como consecuencia incremento de la presión interna de la matriz hasta llegar al punto de superar la propia resistencia del hormigón produciéndose spalling o desconche del revestimiento". (Maccaferri, s.f)

El polipropileno es un material hidrofóbico, es decir no absorbe agua; las fibras de polipropileno no reaccionan químicamente con el concreto, la unión entre ambos materiales se debe a una interacción mecánica. Es una fibra fácil de manipular y no posee propiedades tóxicas lo cual facilita su colocación pues no requiere cuidados extremos.

"Las fibras de polipropileno al añadirse al hormigón se dispersan perfectamente en todo el volumen de éste, lo cual aporta continuidad de modo tal que al fracturarse no se separa. Todo ello, sumado a las características de la fibra (geometría y módulo elástico), repercute en un incremento de la tenacidad y mejor recuperación en la zona post-elástica". (Pujadas, 2009)

A medida que aumenta el contenido total de fibras y la esbeltez (relación entre la longitud y el diámetro equivalente), se incrementan las resistencias a la flexión, impacto, fisuración, tenacidad y ductilidad, pero se dificulta el mezclado y bombeo. Por lo tanto, existen límites prácticos para la cantidad y tamaño de las fibras dependiendo de la forma de las mismas. (Xargay y Balzamo, 2010) Inicialmente el volumen de aplicación de microfibras al concreto fue de aproximadamente un quinto del volumen que había sido usando previamente para macrofibras, dando como resultado adiciones del 0,1% al 0,3% del volumen total de la mezcla. Comparando la dosificación de las microfibras y las macrofibras, se obtuvo un número similar de fibras por volumen unitario de la matriz de concreto, además de similitudes en la superficie específica, lo cual indica que ambas dosificaciones son comparables incluso cuando el volumen de fibras adicionadas es considerablemente mayor en las macrofibras. (ACI 544.1R, 2002).

Los resultados en ensayos previamente realizados a nivel mundial con respecto al comportamiento del concreto con adición de fibras de polipropileno son contradictorios. No se ha registrado una variación contundente en las pruebas de resistencia a la compresión o de módulo de elasticidad del concreto al incorporar fibras en la mezcla (del 0,1% al 2% del volumen), los cambios observados pueden atribuirse a la variabilidad que se presenta durante el trabajo experimental. Para porcentajes de adición mayores al 2% del volumen, se ha registrado menor trabajabilidad en el concreto, mayor sangrado, mayor segregación y mayor contenido de aire atrapado (13.9%), resultando en la disminución de la resistencia a la compresión. (ACI 544.1R, 2002).

Mayores diferencias se encuentran en la forma en que fallan los especímenes sometidos a compresión pura. Se ha encontrado que los cilindros que contienen fibras de polipropileno soportan cargas y grandes deformaciones sin que su falla sea explosiva; el concreto reforzado con fibras sintéticas tiene un comportamiento más dúctil que un concreto simple. (ACI 544.1R, 2002).

No se ha establecido claramente el efecto que tiene la adición de fibras de polipropileno en el módulo de ruptura del concreto. Se han observado leves aumentos en el módulo de ruptura para dosificaciones entre el 0,1% y 0,3% del volumen en comparación con la mezcla de control, sin embargo, conforme se aumenta la cantidad de fibra adicionada disminuye el módulo de ruptura, pues como se dijo anteriormente, también disminuye la resistencia a la compresión al aumentar el contenido de aire atrapado. (ACI 544.1R, 2002).

Uno de los atributos más importantes del concreto reforzado con fibras es el mejoramiento del desempeño de la resistencia a la fatiga comparado con la mezcla de control. En el informe ACI State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete (2002) se define la falla a la fatiga como el máximo esfuerzo de flexión al que una viga soporta dos millones de ciclos de carga, cuya magnitud debe ser lo suficientemente alta para producir en el material un nivel de esfuerzos que disminuya la vida por fatiga del elemento.

Se ha encontrado que aumenta la resistencia a la fatiga cuando se incorpora fibras de polipropileno, incluso en pequeños porcentajes (de 0,1% a 0,3%). Para mejorar la resistencia al impacto algunos fabricantes recomiendan usar de 1,2 a 1,8 kg/m<sup>3</sup>; o sea hasta un 0,2% del volumen de mezcla. (FITESA, 2002).

Las fibras sintéticas son muy efectivas en las primeras horas de vida de la mezcla, cuando la matriz de concreto todavía está débil y su módulo es bajo. En el mercado nacional se prefieren las fibras de polipropileno para el control de fisuración y para prevenir la contracción del concreto durante el fraguado. Conforme el concreto se va endureciendo y aumenta su módulo de elasticidad, las microfibras amarran la mezcla haciéndola continua, lo cual provee una restricción al fisuramiento por contracción plástica.

Los principios de diseño de elementos reforzados con fibras sintéticas son los mismos que para elementos convencionales, incluyendo las recomendaciones de espaciamientos en las juntas para evitar agrietamientos. Un diseño de mezcla puede complementarse con microfibras y macrofibras al mismo tiempo, pero deben acatarse las consideraciones de diseño requeridas para el uso de fibras estructurales.

En Costa Rica se han utilizado fibras de polipropileno (FibroMac 12) en algunos proyectos viales como Av. 3, Av. 10 y Paseo de las Damas. La finalidad de utilizar microfibras en estos casos fue para prevenir la contracción plástica y por secado, ya que se trata de concretos con alto módulo de ruptura (hasta 5,2 MPa).

### 3. Caracterización de los materiales

Se corroboró que los materiales tuvieran la calidad adecuada para ser utilizados como materiales de construcción de acuerdo con las especificaciones del American Society for Testing Materials (ASTM).

#### Agregados

El agregado fino que se utilizó proviene de Guápiles, es arena lavada de río extraída por la empresa MECO y el agregado grueso utilizado es procesado por Quebradores Piedra Grande en Guápiles.

#### Cemento

El cemento utilizado para la fabricación del concreto es del tipo MP/AR, producido por la empresa Holcim.

#### Aditivo

El aditivo utilizado es el Plastiment 931R, producido por la empresa Sika que funciona como reductor de agua de medio rango y plastificante.

## Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno utilizadas en esta investigación son las FibroMac 12 de la empresa Maccaferri, producida a partir de multifilamentos que ayudan a formar una mezcla homogénea. Según su fabricante, se recomienda su uso para prevenir la fisuración por retracción en concretos y morteros y recomienda su aplicación en prefabricados, pavimentos, pisos y revestimientos, utilizando una dosificación de 600 gramos por metro cúbico de concreto.

Se realizaron ensayos con tres porcentajes de adición de fibras distintos, seleccionados con base en los resultados de ensayos previamente descritos en el informe State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete, en donde se indica que para dosificaciones de fibra de polipropileno de 1% del volumen total de mezcla y mayores, se da un aumento en el contenido de aire y por lo tanto disminuye la resistencia a la compresión y a la flexión.

Con el fin de minimizar los efectos de este fenómeno, se eligió utilizar dosificaciones dentro del rango en el cual se han presentado buenos resultados; sin embargo tampoco se asegura un buen desempeño del concreto reforzado con microfibras, pues como se explicó anteriormente existen posiciones encontradas en cuanto a su comportamiento.

Las dosificaciones de FibroMac 12 que se emplearon en esta investigación son 900, 1800 y 2700 g/m<sup>3</sup>, que corresponde aproximadamente a un 0,1%, 0,2% y 0,3% del volumen total de mezcla. Inicialmente se pensó adicionar un 0,5% en lugar del 0,2%; sin embargo a la hora de realizar la colada con adición del 0,3% del volumen total de mezcla se evidenciaron dificultades en la trabajabilidad del concreto por lo que se decidió no aumentar más el contenido de microfibras en la mezcla.

## Diseño de Mezcla

Se realizaron 6 diseños de mezcla preliminares para lograr obtener el diseño con el módulo de ruptura más aproximado al deseado de 4,5 MPa. Según la experiencia de fabricación de concreto durante los ensayos preliminares, se encontró que entre las variables que afectan el comportamiento de la mezcla de concreto se encuentra el orden de incorporación de los componentes del concreto a la batidora, el envarillado del concreto fresco y principalmente la humedad de los agregados.

Para la fabricación del concreto se siguió la norma ASTM C192 Método de Ensayo Normalizado para Preparación y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayo en Laboratorio. Esta práctica contribuyó en el control de la variabilidad propia que presenta la elaboración de las mezclas de concreto. Además, previo a la ejecución de las coladas, los agregados se colocaban en bandejas al aire, de 2 a 3 días, con el fin de homogenizar su contenido de humedad. El día previo a la falla se colocaba todo el material en baldes

con tapa para conservar la humedad y se obtenía una muestra representativa de cada uno de los agregados. La metodología utilizada para el diseño de mezcla se adoptó del ACI-211; sin embargo se realizaron modificaciones a partir de los resultados del pre diseño. Antes de efectuar las mezclas de concreto para los ensayos estáticos y dinámicos, se realizaron 2 pruebas con la mezcla que se asemejó de la mejor manera al módulo de ruptura de 4,5 MPa. Se obtuvo una resistencia a la compresión cercana a los 500 kg/cm<sup>2</sup> y un módulo de ruptura de 4,8 MPa. Se decidió no disminuir la resistencia de la mezcla, ya que al aumentar el contenido de agua podrían presentarse problemas de segregación y sangrado. El revenimiento de ambas mezclas de prueba fue de 16 cm, o sea se trata de una mezcla de consistencia líquida y muy trabajable. En el siguiente cuadro se muestra el diseño de mezcla para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto, dosificado por peso..

Material	P <sub>seco</sub> (kg)	Proporción por peso
Cemento	387,4	1,0
Arena	774,8	2,0
Piedra	968,5	2,5
Agua diseño	172,4	-
Plastiment 931 R (0,7%)	2,7	-
FibroMac 12 (0,1%)	0,9	-
FibroMac 12 (0,2%)	1,8	-
FibroMac 12 (0,3%)	2,7	-

Cuadro 2. Diseño de mezcla

La relación agua-cemento utilizada fue del 0,445%; obtenida a través de experimentación previa. En todos los diseños se consideró el agua de dosificación, que es el agua de diseño corregida para considerar la humedad de los áridos, tomando en cuenta el porcentaje de absorción. En el Anexo B se encuentra el detalle de todos los diseños de mezcla.

## Mezclas de concreto

Existe un cuidado especial que debe tenerse al adicionar polímeros al concreto cuando se usa el revenimiento como indicador de la consistencia. Las fibras permiten que se forme una matriz homogénea de concreto, provista en cierto grado de un amarre interno que reduce la fluidez de la mezcla.

Para garantizar que todos los diseños de mezcla sean semejantes en cuanto a su elaboración, previo a la incorporación de las fibras se determinó el revenimiento de la mezcla. Una vez que se ha comprobado que el revenimiento de la mezcla coincide con el revenimiento de la mezcla de diseño, se adicionan las fibras y se bate el concreto por 2 minutos más.

Al final de cada colada se registraron los datos de revenimiento del concreto con adición de fibras. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro.

<b>Revenimiento Ensayos Estáticos (cm)</b>		
<b>Mezcla</b>	<b>Sin fibra</b>	<b>Con fibra</b>
<b>Control</b>	<b>16</b>	<b>-</b>
<b>0,10%</b>	<b>16,5</b>	<b>11</b>
<b>0,20%</b>	<b>16</b>	<b>5</b>
<b>0,30%</b>	<b>16</b>	<b>3</b>
<b>Revenimiento Ensayos Dinámicos (cm)</b>		
<b>Mezcla</b>	<b>Sin fibra</b>	<b>Con fibra</b>
<b>Control</b>	<b>19</b>	<b>-</b>
<b>Óptima</b>	<b>18</b>	<b>9.5</b>

Cuadro 3. Revenimientos obtenidos experimentalmente

Del cuadro anterior se aprecia que el revenimiento de las mezclas de concreto se reduce sustancialmente al incorporar las fibras de polipropileno. Las mezclas con adición de fibras de polipropileno del 0,2% y 0,3% del volumen total de concreto presentaron una trabajabilidad muy baja, lo cual dificultó el moldeo de los especímenes.

#### 4. Ensayos estáticos & dinámicos

##### Ensayos Estáticos

Se moldearon especímenes cilíndricos de (150 x 300) mm para efectuar los ensayos de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión, mientras que para la determinación de la resistencia a la flexión se utilizaron probetas de (150 x 150 x 535) mm. Se elaboró una mezcla de control y 3 mezclas con adición de fibra sintética (900 g, 1800 g y 2700 g por metro cúbico de concreto). Para los 4 tratamientos se fallaron 3 probetas a compresión, 3 a flexión y 3 por módulo de elasticidad a los 7 y 28 días de curado (en la cámara húmeda). En total se fabricaron 48 cilindros y 24 vigas de

concreto para realizar los ensayos estáticos.

Los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad se realizaron en la máquina de compresión marca Humboldt y para las pruebas de flexión se utilizó la máquina universal.

Los resultados de los ensayos estáticos a los 7 días de curados reflejan que:

Las mezclas con adición de polipropileno del 0,2% y del 0,3% presentan una resistencia a la compresión mayor que la muestras de control, en contraste con la mezcla con adición del 0,1% donde la resistencia a la compresión se reduce.

En cuanto a la resistencia a la flexión los resultados son congruentes con el comportamiento encontrado a la compresión a los 7 días; al aumentar o disminuir la resistencia a la compresión de la mezcla también lo hace la resistencia a la flexión.

En relación con el módulo de elasticidad los especímenes fallados con adición de fibra resultan ser más rígidos que aquellos sin fibra, es decir el módulo de las probetas con adición de fibra es más alto que el de las muestras de control.

Los resultados de los ensayos estáticos a los 28 días de curados reflejan que:

Se determina que todos los tratamientos con adición de fibra de polipropileno presentan una resistencia a la compresión mayor que la mezcla de control; cuanto mayor sea la cantidad de fibra adicionada al concreto, mayor será la resistencia a la compresión del concreto (variando dentro del rango de 0,1% a 0,3% del volumen de mezcla).

En relación con la resistencia a flexión, los tratamientos con adición de fibra del 0,2% y del 0,3% del volumen total de mezcla presentaron MR mayores que la mezcla de control a los 7 días de curado, pero a la edad de 28 días se observa un cambio en la tendencia del comportamiento a la flexión del concreto.

El concreto con adición de polipropileno presenta menor resistencia a la rotura por flexión que el concreto convencional; sin embargo la disminución del módulo de ruptura no es proporcional a la cantidad de fibras adicionada.

Según los resultados obtenidos, el módulo de Young aumenta al adicionar las microfibras al concreto; es decir las fibras aportan rigidez a la mezcla de concreto endurecido.

Después de analizar el comportamiento de los 4 tratamientos para los ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad se encuentra que las fibras de polipropileno confieren rigidez.

Del proceso de evaluación y los resultados se tiene lo siguiente: Estos resultados se diferencian de los resultados descritos por Koss (2001) y Boada y Pérez (2010) en sus investigaciones, quienes encontraron un aumento en la resistencia a la flexión del concreto al adicionar polímeros sintéticos. Además, Boada y Pérez registraron una disminución del  $f'c$ , mientras que Koss afirma que la ganancia de resistencia a la compresión no es significativa.

Según lo observado durante la fabricación de los especímenes, la mezcla se torna seca al adicionar las fibras, se disminuye el revenimiento considerablemente y se reduce la trabajabilidad debido a la interacción mecánica entre las fibras y la mezcla de concreto. A pesar de que el polipropileno sea caracterizado como un material hidrofóbico, los resultados demuestran que las fibras si afectan la relación agua-cemento.

Al variar la relación agua-cemento de la mezcla, para concretos con adición de fibras, se incrementa la resistencia a la compresión y aumenta el módulo de elasticidad; sin embargo el incremento en la rigidez del concreto influye negativamente en el comportamiento a la flexión de la mezcla pues se disminuye el módulo de ruptura. Es posible que la utilización de fibras si mejore el desempeño de la mezcla frente a la contracción por secado pues se evidenció la interacción mecánica de las fibras con la mezcla en estado fresco; pero deben usarse dosificaciones cercanas a las recomendadas por el fabricante de las fibras para no afectar la relación A/C.

### Análisis de Varianza

Se realizó un análisis de varianza ANOVA para la comparación simultánea de las medias de los resultados de todos los tratamientos. Se trata de verificar que no exista una variación significativa en estos valores durante el periodo en el que se tomaron las mediciones.

Para todos los análisis de varianza se compararon las medias de los 4 tratamientos para los 3 ensayos estáticos realizados a 7 y 28 días y se tomó como nivel de significancia un valor de  $\alpha = 0,05$ . Las hipótesis que se plantearon fueron las siguientes:

$$H_0 : \mu_{control} = \mu_{0,1\%} \quad [10]$$

$$H_1 : \text{las medias no son iguales} \quad [11]$$

Para probar la hipótesis nula se llenó la tabla ANOVA para cada uno de los casos. Los resultados se presentan a continuación.

A partir los resultados estadísticos obtenidos mediante el análisis de varianza ANOVA se determinó que el único efecto significativo que causa la adición de fibras de polipropileno al concreto es el aumento en la resistencia a la compresión a 28 días. Todas las demás variaciones encontradas en los resultados de la mezcla pueden atribuirse a la variabilidad propia del concreto.

### Porcentaje óptimo de fibra

El porcentaje óptimo de fibra se utilizó para realizar los ensayos dinámicos y se comparó contra el comportamiento del concreto convencional.

Se escogió el porcentaje de fibra del 0,1% del volumen total de mezcla como el porcentaje óptimo. Los ensayos dinámicos están relacionados con la prueba de flexión en el concreto, por lo que se prefirió escoger como porcentaje óptimo a la dosificación que presentó menor reducción en el módulo de ruptura. El módulo de ruptura del concreto con 0,1% de fibra disminuyó un 4,81%, mientras que los concretos con 0,2% y 0,3% de fibra redujeron el módulo de ruptura en 8,04% y 5,01% respectivamente.

Pese a que las variaciones entre una dosificación y otra no son significativas, se eligió utilizar el menor porcentaje de adición de fibra ya que se acerca más a la dosificación recomendada por el fabricante de las fibras (600 g/m<sup>3</sup>). Además con la dosificación de fibra del 0,1% del concreto se obtiene la mezcla más trabajable.

### Ensayos Dinámicos

Para efectuar los ensayos dinámicos se realizaron pruebas con 2 tipos de tratamientos; la mezcla de control y la mezcla con adición de fibra del porcentaje óptimo (0,1% del volumen total de mezcla). Se realizaron ensayos de módulo dinámico y fatiga en probetas prismáticas de (150 x 150 x 535) mm, siguiendo los lineamientos establecidos por Austroads (2012). El equipo de carga utilizado para llevar a cabo ambos ensayos fue el Material Test System MTS 810, en conjunto con el controlador TestStar IIS asociado al programa de obtención de datos Station Manager.

El equipo de carga consta de un pistón hidráulico, previamente programado para aplicar carga cíclica, una viga de carga y el apoyo inferior, que simula la condición simplemente apoyada de la viga para inducirle esfuerzos de flexión en su tercio central. En la 6 puede apreciarse el montaje para ambos ensayos.

Para cada pulso de carga se obtuvo la carga aplicada, la deformación en la fibra extrema inferior de la viga y la deflexión del espécimen. Para esto se colocó una galga extensométrica de Vishay Measurements Group en el centro de la cara inferior de la viga y se conectó al programa de obtención de datos. Además se instaló un transformador diferencial de variación lineal (LVDT por sus siglas en inglés) para medir el desplazamiento asociado a cada pulso de carga; sin embargo no se lograron resultados satisfactorios con el LVDT. Las mediciones registradas con el LVDT no aportaron resultados coherentes durante los ensayos dinámicos, por lo que se descartaron los datos recolectados y se trabajó únicamente con las mediciones de las galgas. El error del LVDT puede deberse a la sensibilidad del equipo ya que se registraron desplazamientos cuyo orden de magnitud es inferior a la tolerancia del aparato.

Luego de 28 días de curado como mínimo, las probetas se sacaron de la cámara húmeda y se secaron al aire por al menos 2 días.

### Módulo Dinámico

Neville (2005) define el módulo dinámico como aquel que se determina por medio de la vibración de una probeta de hormigón, al aplicar un esfuerzo insignificante. Austroads sugiere que la magnitud de los pulsos de carga no sea mayor que el 40% de la carga máxima de rotura determinada durante el ensayo de flexión. En razón de ello, se aplicaron 100 pulsos de un segundo de duración; incluyendo la aplicación de pulsos de 250 ms de carga cíclica haversiana y un descanso de 750 ms entre pulsos de carga, tal y como se presenta en la siguiente Figura.

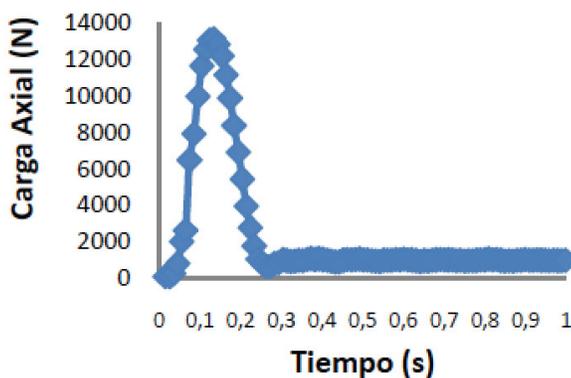


Figura 3. Ciclo de carga para el ensayo de módulo dinámico

Además, se aplicó el 35% de la carga máxima soportada por las vigas para el ensayo de flexión (ASTM C78), que suficientemente bajo para no dañar la viga por lo que se evalúa dentro del rango elástico; pero suficientemente alto para medir las deformaciones producto del esfuerzo de tensión en el tercio central del espécimen.

Para obtener el valor de la carga máxima de rotura a la flexión, se realizó nuevamente el ensayo utilizando vigas secas al aire, en iguales condiciones de humedad que las probetas falladas para módulo dinámico y fatiga. No se tomó el valor de la carga de rotura obtenido mediante los ensayos estáticos ya que dichas vigas fueron falladas en condición húmeda y esto incide notablemente en el comportamiento a la flexión de la muestra.

Para el cálculo de los módulos dinámicos se recurrió a la teoría de la elasticidad, asumiendo que el concreto se encuentra en el rango elástico por lo que el módulo puede obtenerse con la inercia bruta se la sección, es decir la inercia no agrietada. Según la ley de elasticidad de Hooke, el módulo es la razón entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria sufrida por el material. El módulo dinámico se calculó con el promedio de los últimos 50 ciclos de carga del total de 100 ciclos aplicados al espécimen, como se muestra a continuación.

$$(4)$$

donde,

E=módulo dinámico del concreto (MPa)

MR= según ecuación [2]

$\epsilon$ =deformación unitaria en la fibra extrema en tensión (mm/mm)

### Resultados

A continuación se presentan los resultados de las pruebas de flexión para los ensayos dinámicos.

<u>Tratamiento</u>	<u>Carga máx P (N)</u>	<u>MR (MPa)</u>
Control	35 570	4,50
0,1% fibra	34 325	4,38

Cuadro 1. Ensayo de flexión

Se presenta una reducción del 3,5% en la resistencia a la flexión de las muestras con polipropileno, resultado esperado pues coincide con el comportamiento de las muestras ensayadas para las pruebas estáticas. La variación entre ambos tratamientos no necesariamente se debe al contenido de polipropileno.

Muestra	Mezcla de control			Mezcla con fibra polipropileno %Opt 0,1		
	Pmax (N)	ε (mm/mm)	Ed (GPa)	Pmax (N)	ε (mm/mm)	Ed (GPa)
1	13 189,37	6,326E-05	27,80	12 676,03	6,789E-05	24,90
2	13 215,62	5,837E-05	30,19	12 686,84	7,021E-05	24,09
3	13 230,63	6,431E-05	27,43	12 662,43	6,967E-05	24,23
Estadística	Promedio		28,4	Promedio		24,41
	Desviación Estándar		1,50	Desviación Estándar		0,43

Cuadro 2. Módulos dinámicos (concreto seco), con 35% de carga máxima de rotura, vigas secas al aire.

El módulo dinámico de la mezcla polipropileno, presenta una variación 14,28% respecto de la mezcla de control, situación contraria a lo sucedido con los ensayos estáticos. Por lo tanto, el concreto con polipropileno resulta más flexible, a menor módulo mayor deformación, esto siempre y cuando la carga aplicada sea cíclica, pues en condiciones de carga sostenida el concreto con fibra presenta un módulo mayor que la mezcla de control.

El libro Properties of Concrete establece que no puede esperarse una relación directa entre los módulos estático y dinámico del concreto, debido a que la heterogeneidad del material afecta a ambos módulos de distinta manera; sin embargo se presentan correlaciones empíricas, como las dadas por Lydon y Balendran o por el Código Británico para el Diseño de Estructuras de Concreto, que sugieren que el módulo dinámico es mayor que el estático. Por su parte, la norma ASTM C469 Método Estándar de Ensayo para Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson del Concreto, los valores del módulo de elasticidad obtenido con esta norma son usualmente menores que los módulos derivados de la aplicación de carga dinámica o sísmica.

En el caso de las pruebas de módulo dinámico realizadas en la presente investigación, no fue posible comparar los módulos estáticos y dinámicos, ya que ambos ensayos se ejecutaron bajo condiciones de humedad diferentes.

### Análisis de varianza

Se realizó un análisis de varianza ANOVA para la comparación simultánea de las medias de los resultados de ambos tratamientos. Se tomó como nivel de significancia un valor de  $\alpha = 0,05$ . Las hipótesis que se plantearon fueron las siguientes:

$$H_0 : \mu_{control} = \mu_{0,1\%} \quad [10]$$

$$H_1 : \text{las medias no son iguales} \quad [11]$$

Con este análisis se determinó que el promedio de los resultados de la prueba de módulo dinámico de ambos tratamientos (control y 0,1%). Mediante el análisis de varianza se demostró que el concreto modificado con polipropileno al 0,1%) presenta un módulo dinámico inferior que el concreto convencional, en un 14%.

### Fatiga

El ensayo de fatiga consiste en aplicar pulsos de carga haversiana a la viga, hasta llevarla a la falla. Cada periodo de los pulsos de carga incluye 250 ms de carga y 250 ms de descanso (Ver Figura 4).

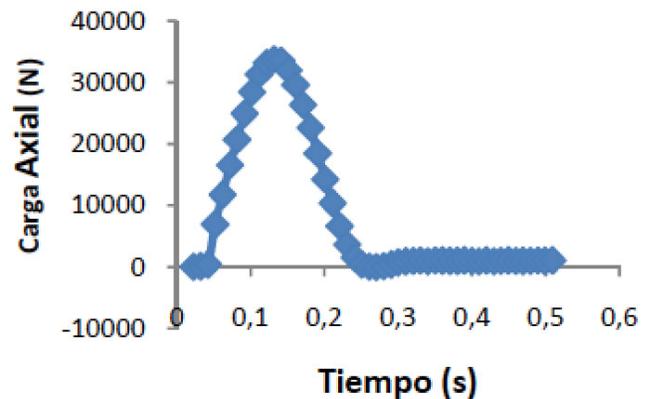


Figura 4. Ciclo de carga para el ensayo de fatiga

Relación de Esfuerzo, SR	P <sub>aplicada</sub> (N)	
	Mezcla control	Mezcla con % Ópt polipropileno
95%	33792	32609
85%	30235	29176
75%	26678	25744

Cuadro 3. Cargas máximas aplicadas para el ensayo de fatiga

Usualmente se aplica entre el 50% y el 90% de la carga estimada de falla por flexión, dentro de este rango se fallaron los mismos especímenes de cada tratamiento que se utilizaron en el ensayo en el módulo dinámico, pues se supone que no presentan deformación permanente pues se aplicó 35% de su carga máxima de rotura por 100 ciclos.

## Resultados

Relación de Esfuerzo, SR	Número de ciclos	
	Mezcla de control	Mezcla con % Opt polipropileno
95%	28	48
85%	150	336
75%	9212	1558

Cuadro 4. Resultados del ensayo de fatiga

Se fallaron 3 vigas para cada relación de esfuerzos, y se evidenció que los especímenes con fibra soportan más ciclos hasta la falla para las relaciones de esfuerzos de 95% y el 85%; no así para el 75%, que sucede lo contrario. Esta variación podría deberse a un error durante el ensayo, pero como sólo se realizó la falla de una viga por punto, no fue posible verificar los resultados obtenidos.

Se interpreta que las mezclas con polipropileno presentan mejor comportamiento a la fatiga ante la aplicación de cargas altas o cercanas a la carga máxima de rotura por flexión, esto es debido a que ante la acción de cargas dinámicas el concreto con polipropileno gana tenacidad, al disminuir su módulo de elasticidad dinámico (más deformable).

Relación de Esfuerzo, SR	Mezcla Control	Mezcla % Ópt polipropileno
	$\epsilon$ ( $\mu\text{s}$ )	$\epsilon$ ( $\mu\text{s}$ )
95%	766	957
85%	621	719
75%	701	602

Cuadro 5. Deformaciones máximas

Ninguna de las deformaciones máximas corresponde con la deformación en el momento de la rotura de las vigas, esto porque las galgas extensométrica fallaron antes que las vigas. Se confirma que las fibras de polipropileno aportan tenacidad al concreto ante la aplicación de cargas dinámicas, dado que éstas registran deformaciones mayores, a excepción de la falla con SR del 75%.

Propiedad	Mezcla Control	Mezcla % Ópt polipropileno
<b>Módulo inicial por fatiga</b>		
$E_{\text{inicial}}$ (GPa)	19,43	17,09
50% $E_{\text{inicial}}$ (GPa)	9,71	8,54
<b>Módulo dinámicos</b>		
E fatiga (GPa)	19,43	17,09
E módulo dinámico (GPa)	28,47	24,41

Cuadro 6. Comparativo módulos

Según Austroads (2012), el módulo de elasticidad inicial se obtiene del promedio de los módulos de los primeros 50 ciclos de carga aplicados al espécimen durante el ensayo de fatiga. Así se fallaron muestras al 85% de su resistencia máxima a la flexión, asumiendo que la acumulación de deformaciones plásticas es muy pequeña y por ende puede usarse la Ley de Hooke para calcular los módulos, mediante los datos de deformación tomados por las galgas, según se indica en la tabla anterior.

En esa misma tabla, se observa una misma tendencia en el módulo dinámico obtenido a partir de los primeros 50 ciclos de carga del ensayo de fatiga (módulo inicial), siendo un 12,04% mayor para la mezcla de control. Por otro lado, se nota un aumento de aproximadamente 30% de los módulos de elasticidad estimado por ensayo dinámico en relación con el obtenido por fatiga. La diferencia se debe principalmente a la magnitud de la carga utilizada en cada ensayo y a que se utilizan frecuencias distintas durante la aplicación de los ciclos de carga.

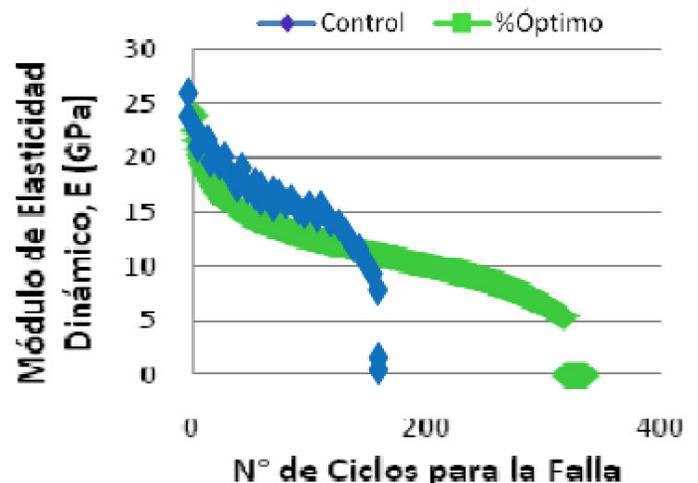


Figura 5. Reducción del módulo para ensayo con concreto de control y con FibroMac 12

En la figura se observa que el módulo de elasticidad del concreto (fallado a una relación de esfuerzos del 85%), para ambos casos, decrece (por microfisuramiento) y se reduce más del 50% antes de llegar a la falla, es decir superó la vida de fatiga estimada para ambos especímenes. Las galgas extensométricas fallaron antes de que finalizara el ensayo, la menor deformación se presentó cuando la reducción del módulo inicial fue de 64% y 69%, para el concreto convencional (control) y con polipropileno, respectivamente.

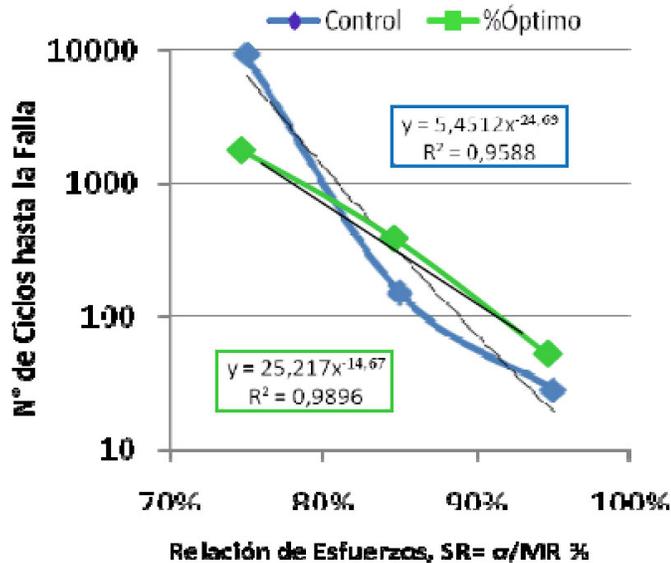


Figura 6. Curva de fatiga de concreto MR-4,5 MPa convencional (control) y con FibroMac 12.

En la anterior figura se grafica la relación de esfuerzos SR (variable independiente) y el número de ciclos hasta la falla N, representado en escala logarítmica (variable dependiente), para obtener el modelo de fatiga con regresión potencial por el método de mínimos cuadrados. El coeficiente de correlación de la recta de mejor ajuste para ambos modelos de fatiga, es aceptable, pues el valor del r2 es cercano a la unidad. Es así como se define que la ecuación de fatiga para:

- Concreto convencional (control), es:  
$$\text{Log}(N) = \text{Log}(5,451) - 24,6 \cdot \text{Log}(SR) \quad [10]$$

- Concreto modificado con 900 g de FobroMac12, por metro cúbico de mezcla (0,1%), es:  
$$\text{Log}(N) = \text{Log}(25,21) - 14,6 \cdot \text{Log}(SR) \quad [12]$$

donde,

*N*=número de repeticiones de carga aplicadas hasta la falla  
*SR*=Relación de esfuerzos

Una vez obtenidos ambos modelos de fatiga se procede a realizar el diseño mecanicista del concreto.

## 5. Diseño mecanicista

El diseño mecanicista de pavimentos permite proyectar el daño de la losa a largo plazo, se revisa la estructura diseñada con un modelo de deterioro para evaluar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida útil. Se introduce el modelo de deterioro de fatiga, obtenido anteriormente mediante ensayo de laboratorio, para los dos concretos, convencional y con FibroMac 12 en un 0,1%.

### Diseño de la estructura de pavimento rígido

La estructura de pavimento se diseño basado en el método AASHTO 93, con el tránsito promedio diario (TPD) de la encuesta de carga real vehicular realizada por LanammeUCR para la Ruta Nacional N°1, en sentido de tránsito Cañas-San José, de enero a setiembre del 2009. Aplicando un periodo de diseño de 20 años y un factor de crecimiento del 4% (vías nacional), se determinó un ESAL de nueve millones ochocientos cuarenta y cinco mil ejes equivalentes de 80 kN. Además, se consideraron los siguientes parámetros de diseño del pavimento, según del AASHTO 93: ZR=-1,645; So=0,3; J=3,6; Cd=1,0; Po=2,4; Pt=2,5; ΔPSI= 2,0 y k(pci) =160.

La losa de concreto convencional resultó ser más delgada, debido a que el concreto con fibra posee un módulo de ruptura menor. Luego se evaluaron ambas losas de las ecuaciones de fatiga, pero con valores típicos de los materiales presentes en Costa Rica dados por Porras (2009).

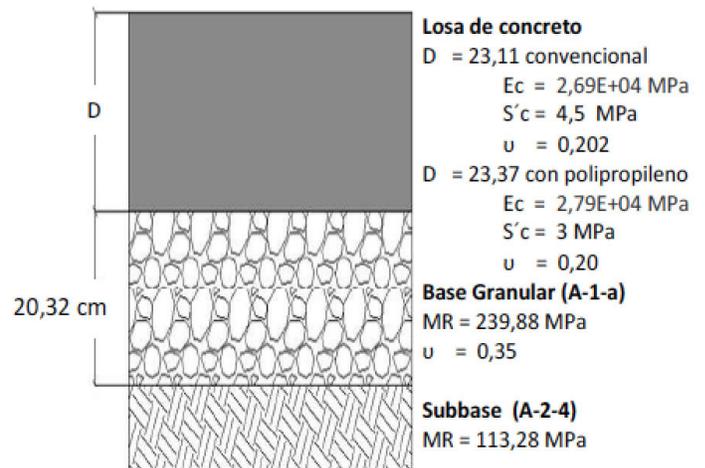


Figura 7. Diseño de losa de concreto simple y con adición de polipropileno

### Revisión por fatiga: modelado en el software ISLAB2000

Con el software de elemento finito ISLAB2000, creado por ERES Consultants, se calcularon los esfuerzos y deformaciones en las losas de concreto, producto de la aplicación de carga del camión de diseño. El camión de diseño elegido es el más representativo (60% del total de vehículo), en este caso el T3-S2, vehículo con mayor relación de cargas respecto del número de llantas (18 ruedas), por lo que produce más daño a la estructura. Además, como está autorizado para transportar 39 toneladas, por tener un eje trídem en lugar de tándem, distribuye de manera más eficiente las cargas hacia el pavimento, por eso el daño que realiza es menor. Se utilizó una presión de inflado de las llantas de 120 psi según la sugerencia de la guía MEPDG

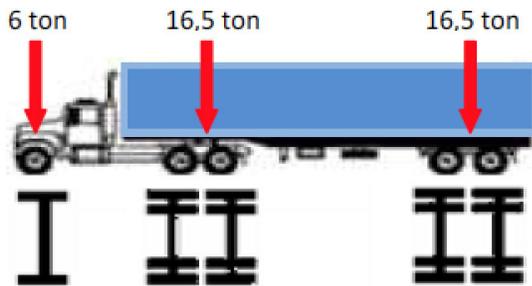


Figura 8. Camión de diseño T3-S2 Fuente: Allen y Badilla, 2011 (Modificado por: Autor)

Se consideró un pavimento tipo JPCP con dovelas transversales, 85% de eficiencia en la transferencia de carga del en sentido longitudinal, y 50% en el sentido transversal, según la guía MEPDG. Se incorporó un espaldón de 0,5 metros, sin juntas transversales, para 10% de la eficiencia de transferencia de carga, según. Vega (2012).



Figura 8. Camión de diseño T3-S2 Fuente: Allen y Badilla, 2011 (Modificado por: Autor)

### Grietamientos transversales de abajo hacia arriba

Se presentan cuando el eje direccional (mayor relación de carga entre número de llantas) se posiciona en el centro longitudinal de la losa, muy cerca del borde o hacia el espaldón. Las cargas de tránsito generan esfuerzos de tensión en la parte inferior de la losa que pueden ser incrementados cuando se presenta alabeo por temperatura.

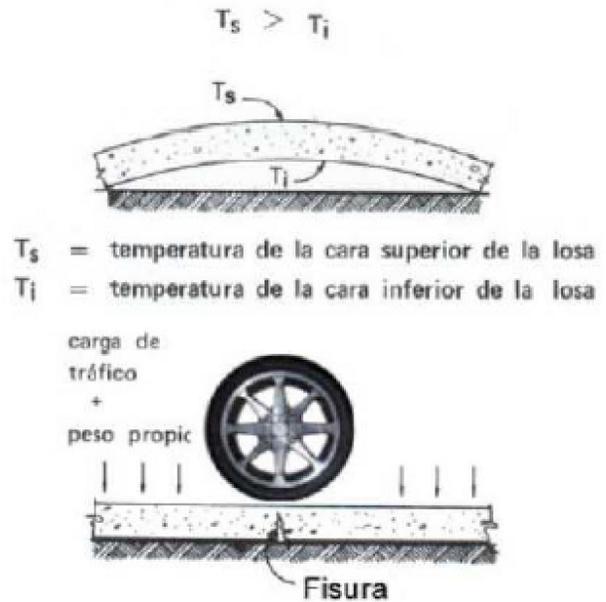


Figura 10. Agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa. Fuente: Román, 2008

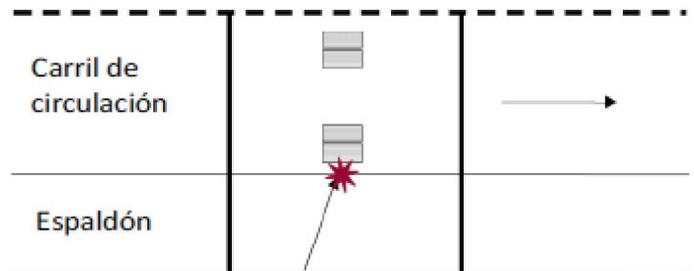


Figura 11. Ubicación de esfuerzo crítico (arriba de la losa). Fuente: MEPDG, 2004, Modificado por: Autor

Las diferencias de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa, incide en los esfuerzos críticos. Durante el día, la parte superior de la losa queda expuesta al sol; la losa se expande en la superficie y adopta una curvatura convexa, por lo que se forma un vacío o pérdida de soporte bajo el centro de la losa. Cualquier fuerza que restrinja el movimiento de la losa, incluyendo el peso propio del pavimento, va a producir un esfuerzo, que por el alabeo de la losa, incrementan los esfuerzos de tensión inferior y origina agrietamiento de abajo hacia arriba del elemento. En este estudio no se toma en cuenta el gradiente térmico pues en Costa Rica no se presentan variaciones extremas en la temperatura a lo largo del día.

### Agrietamientos transversales de arriba hacia abajo

El gradiente de temperatura negativo se presenta en las noches, la losa adopta una curvatura cóncava que forman vacíos en los extremos del elemento dando lugar a un incremento en los esfuerzos de tensión en la superficie del pavimento. Si estos esfuerzos de tensión superan los esfuerzos de compresión provocados por el tránsito, entonces se presenta el esfuerzo crítico en la superficie de la losa y ocurre agrietamiento de arriba hacia abajo.

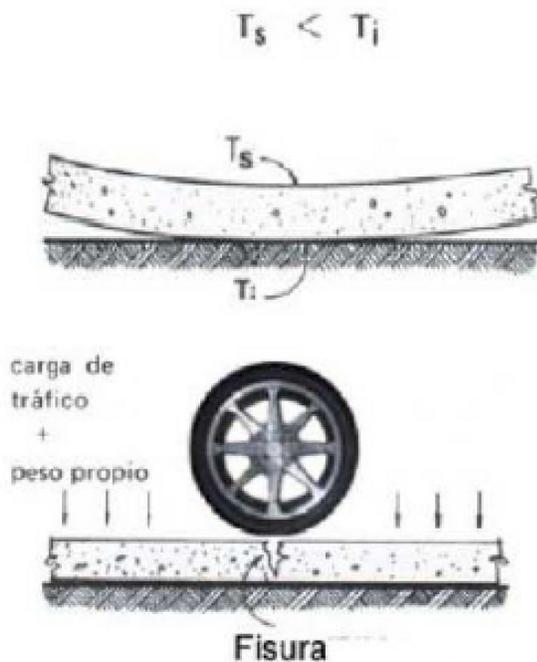


Figura 12. Agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa. Fuente: Román, 2008

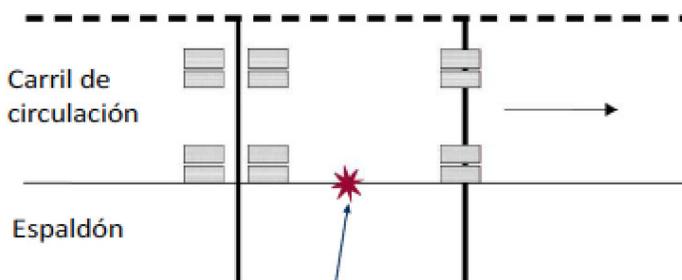
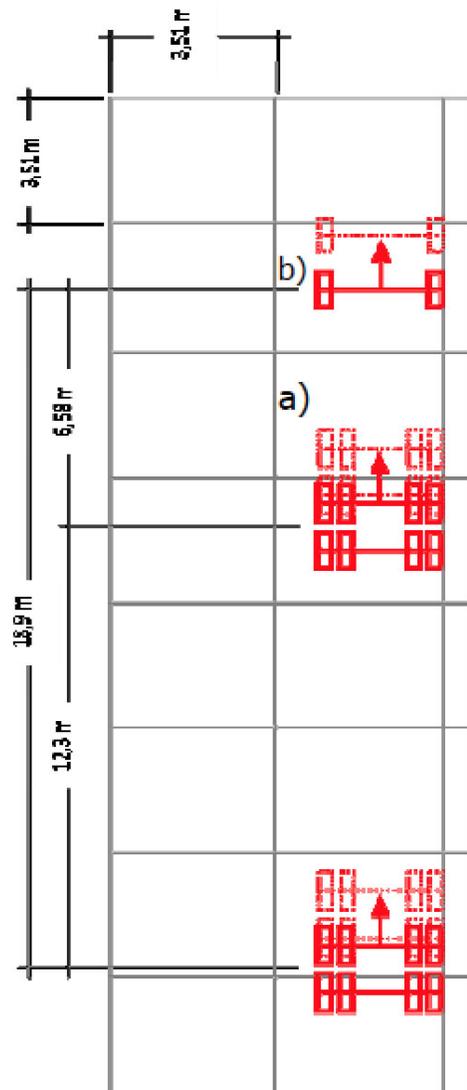


Figura 13. Ubicación de esfuerzo crítico (abajo de la losa). Fuente: MEPDG, 2004 Modificado por: Autor

Para que se presente la condición crítica debe haber una geometría de losas que permita que dos ejes del camión se coloquen sobre los extremos del elemento simultáneamente. Bajo esta configuración de cargas se favorece la ocurrencia de mayores esfuerzos de tensión en la superficie del pavimento.

### Resultados

La configuración de 8 losas de 3,5 x 3,5m, utilizadas el programa de elemento finito ISLAB2000, se presenta en la siguiente figura de acuerdo con los criterios de falla de la guía MEPDG. Se colocaron los ejes del vehículo T3-S2 lo más cerca posible tanto de una junta transversal como de longitudinal. No fue posible acomodar 2 ejes del camión de diseño sobre una misma, para la falla por agrietamiento de arriba hacia abajo, ya que longitudes de losas mayores no tendría sentido práctico, pues no se construyen en proyectos reales (pavimentos JPCP).



La terminación del antepecho en los muros con ventanas en toda su extensión se realizó con un platacho especial Fig 23.-, confeccionado de tal forma que permitía dejar el alféizar listo para recibir los marcos de ventanas, al igual que con el Box – Out, debido a que no se podían hacer reparaciones con mortero en este ni en ningún otro elemento a la vista.

Figura 14. Ubicación T3-S2 para evaluar a fatiga dos casos para producir:  
 a) Agrietamientos de abajo hacia arriba de la losa (línea continua)  
 b) Agrietamientos de arriba hacia abajo de la losa (línea discontinua)

A continuación se presentan los resultados del programa de modelación ISLAB2000. En negativo, las deflexiones positivas se refieren a “hundimientos”, y el caso contrario en negativo.

Los agrietamientos de abajo a arriba de la losa se representan bien para ambos tipos de concreto, pues la concentración de esfuerzos críticos (color rojo) se presentó en el punto donde se esperaba, en el centro de la losa y cerca del borde longitudinal (ver figura 15 y 16). Además, los esfuerzos que se obtuvieron en la parte de abajo de la losa son mayores que los esfuerzos en la superficie, por lo que es factible la ocurrencia de la falla tal y como se planteó.

Los agrietamientos de arriba hacia abajo de la losa, no se representan adecuadamente. Las cargas de tránsito siempre producen esfuerzos de compresión en la parte superior y esfuerzos de tensión en la parte inferior de la losa, así que la única manera de lograr que se origine una grieta de arriba hacia abajo es considerando los esfuerzos inducidos por el gradiente de temperatura negativo. (MEPDG, 2004), y como este análisis de gradiente térmico no se incluyó, los esfuerzos calculados para ambos casos resultaron similares, los puntos críticos para el modelo de agrietamiento de arriba-abajo se dan bajo las llantas del camión de diseño (ver figura 17 y 18).

Las deflexiones se presentan en los puntos de aplicación de la carga, tal y como era de esperar. En todos los casos modelados las deflexiones mayores (signo positivo, hacia abajo de la estructura de pavimento) se presentan debajo del eje tándem “driving”, cerca de la junta transversal, donde se pierde eficiencia en la transferencia de carga.

El modelado real del agrietamiento es muy complejo, por lo que se utilizan factores empíricos de calibración para predecir el deterioro en campo. La siguiente ecuación sirve para calcular el número de repeticiones de carga permisibles hasta la rotura según la guía mecanicista MEPDG.

$$\text{Log}(N) = 2 \cdot \left( \frac{MR}{\sigma_{\text{aplicado}}} \right)^{1,22} + 0,4371 \quad [13]$$

**Agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto convencional (a)**

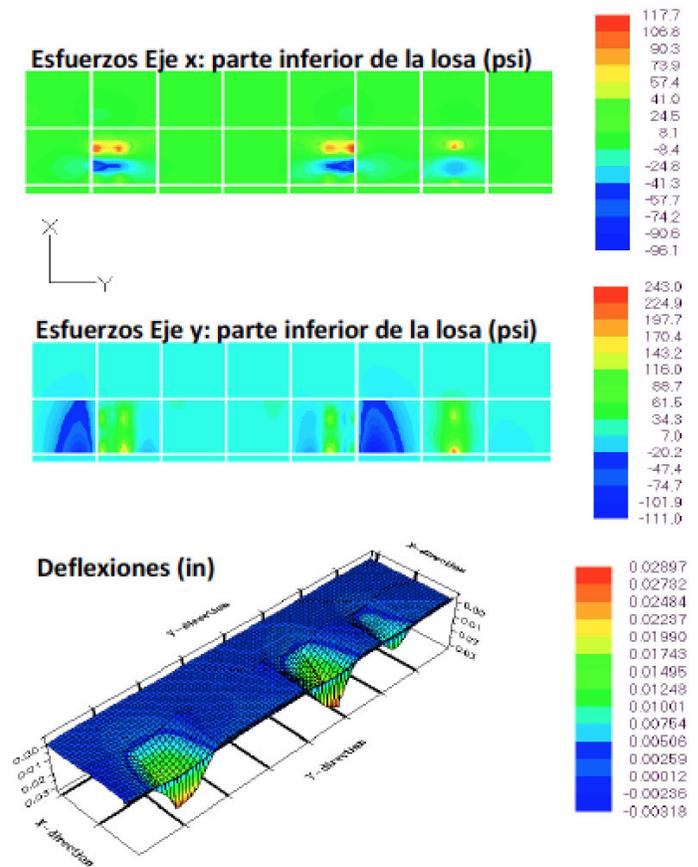


Figura 15. Condición de falla tipo (a)

**Agrietamiento de abajo hacia arriba de la losa de concreto con polipropileno (c)**

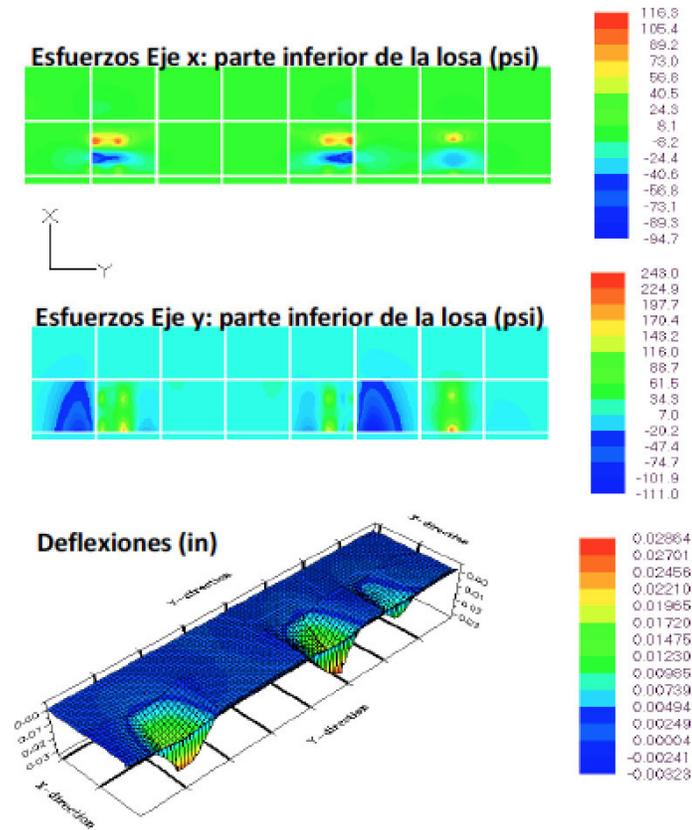


Figura 16. Condición de falla tipo (c)

**Agrietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto convencional (b).**

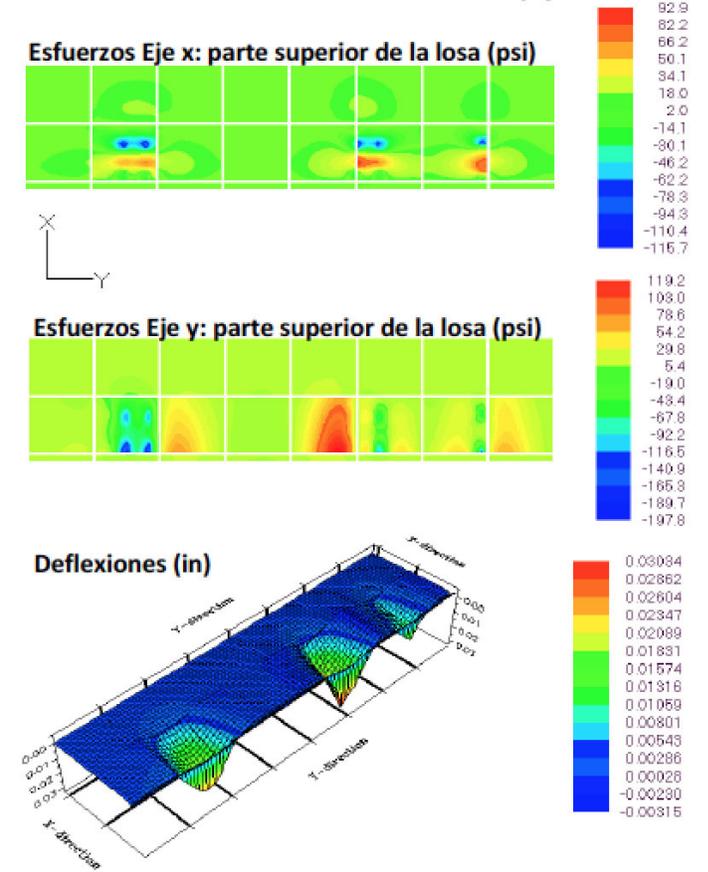


Figura 17. Condición de falla tipo (b)

**Grietamiento de arriba hacia abajo de la losa de concreto con polipropileno (d).**

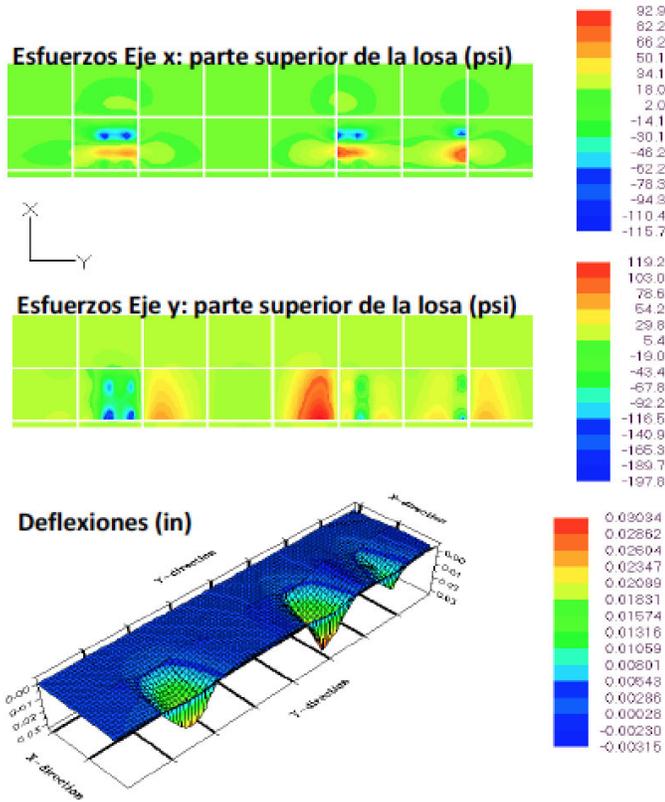


Figura 18. Condición de falla tipo (d)

Los resultados se presentan en psi, por la versión del software que tiene el LanammeUCR. Los esfuerzos de tensión en signo positivo y compresión. Los anteriores resultados se compararon contra los resultados utilizando la ecuación brindada por la guía MEPDG, el cuadro. No se incorpora el pavimento con adición de fibra ya que dicha guía no presenta ningún modelo de deterioro para concreto con polipropileno.

Tipo de concreto		Simple		Con Fibra	
Criterio de falla		↑	↓	↑	↓
		a	b	c	d
$\sigma_{aplic}$	Esfuerzo aplicado (MPa)	1,68	0,83	1,66	0,82
MR	Módulo de ruptura (MPa)	4,50	4,50	4,38	4,38
SN	Relación de esfuerzos	0,37	0,18	0,38	0,19
N fatiga	Repeticiones Admisibles	1,971E+11	6,443E+18	3,673E+07	1,023E+12
N MEPDG	Repeticiones Admisibles	1,335E+07	1,565E+16	-	-

Cuadro 7. Resultados del análisis elemento finito

Del cuadro anterior se deriva que las repeticiones de carga admisibles varían según el modelo de deterioro aplicado. Esto demuestra la necesidad de calibrar el modelo obtenido mediante pruebas de laboratorio con factores de correlación en campo. En todos los escenarios planteados, los esfuerzos de tensión producidos por el vehículo de diseño llevan a relaciones de esfuerzos muy bajas y por ende las repeticiones de carga admisibles que puede soportar el pavimento resultan mucho mayores que el ESAL de diseño (9,8 millones de ejes equivalentes). Según los resultados obtenidos, en ninguno de los casos se presenta un daño por fatiga significativo, a pesar de que los camiones T3-S2 representen el 60% de los vehículos que transitan por la ruta.

Tal y como se había mencionado en el apartado 4.2.21 anterior, el posible error que se produjo en el ensayo de fatiga durante la falla del espécimen con relación de esfuerzos del 75%, afecta los resultados obtenidos con la modelación del software de elemento finito. La cantidad de repeticiones de carga admisibles hasta la falla en el concreto con fibras es menor que para el concreto convencional, según la ecuación de fatiga obtenida para la mezcla con polipropileno, cuanto menor sea el esfuerzo aplicado menor será la resistencia a la fatiga.

Según el análisis de resultados realizado para los ensayos de fatiga, el concreto con adición de fibras llega a ser más resistente a la fatiga que el concreto simple, lo cual no se refleja en el modelo.

**6. Conclusiones & recomendaciones**

Las pruebas de caracterización de los materiales indicaron que los agregados y el cemento son de buena calidad y son aptos para la fabricación de mezclas de concreto.

A pesar de que el FibroMac12 es un material hidrofóbico, su incorporación afecta notablemente la relación agua-cemento, pero porque las fibras generan un amarre dentro de la matriz cementante, afectando la trabajabilidad. Al variar la relación agua-cemento de la mezcla, se incrementa la resistencia a la compresión y aumenta el módulo de elasticidad; sin embargo el incremento en la rigidez del concreto influye negativamente en el comportamiento a la flexión de la mezcla pues se disminuye el módulo de ruptura.

Es posible que la utilización de fibras mejore el desempeño de la mezcla frente a la contracción por secado, dada la interacción mecánica de las fibras con la mezcla en estado fresco; pero debe usarse dosificaciones cercanas a las recomendadas por el fabricante para no afectar la relación A/C.

A los 28 días de edad, las mezclas de los distintos tratamientos no presentaron variaciones significativas en la resistencia a la flexión ni en el módulo de elasticidad.



Puede afirmarse que la adición de fibras de polipropileno incide en la ganancia de resistencia a la compresión de la mezcla, para dosificaciones de hasta 0,3% del volumen de mezcla. Con dosis mayores se recomienda, siempre y cuando se calibre el diseño de mezcla, el uso fluidificantes para mejorar la trabajabilidad del concreto.

Se logró implementar satisfactoriamente el ensayo de fatiga para mezclas de concreto con adición de fibras sintéticas en el LanammeUCR.

El concreto con adición de fibras de polipropileno gana tenacidad, pues su módulo de elasticidad dinámico se disminuye, o sea el material se vuelve más deformable, siempre y cuando la aplicación de cargas sea cíclica y se logre someter el elemento a la flexión. No fue posible comparar los módulos estáticos y dinámicos obtenidos en esta investigación, ya que ambos ensayos se ejecutaron bajo condiciones de humedad diferentes.

Las mezclas con adición de fibra presentan mejor comportamiento a la fatiga por cargas dinámicas, que el concreto convencional con incrementos de 42 y 55% (Cuadro 4). Además, gana tenacidad, pues su módulo de elasticidad dinámico disminuye en un 14% (Cuadro 6), o sea se vuelve más deformable.

La dosificación óptima de fibra no afecta las propiedades mecánicas del concreto determinadas mediante ensayos estáticos, pues tanto el concreto de control como el concreto con 0,1 % de polipropileno superaron la vida útil por fatiga.

Los modelos de fatiga obtenidos aplican únicamente para los materiales utilizados en la presente investigación.

Con el diseño mecanicista de pavimento realizado, se encontró que la losa para concreto con adición de fibra de polipropileno supera apenas en 0,1 pulgadas (2,54 mm) la losa de concreto simple. Por lo tanto, el uso de microfibras no reduce el espesor del elemento estructural.

Con la incorporación de los modelos de deterioro en el diseño no se alcanzaron los resultados esperados, debido a la necesidad de aplicar un factor de correlación de campo para las ecuaciones obtenidas mediante los ensayos dinámicos.

No se logró representar adecuadamente el criterio de falla por agrietamiento transversal de arriba hacia abajo, dado que se excluyó de la modelación el efecto del gradiente térmico en el incremento de los esfuerzos de tensión.

Con respecto al número de pruebas realizadas para esta investigación, podría aumentarse la cantidad de probetas ensayadas con el fin de aumentar los grados de libertad utilizados en los análisis de varianza ANOVA y así comprobar la significancia de los resultados.

Los modelos de fatiga obtenidos sirven como aporte inicial al tema de la fatiga del concreto en Costa Rica. Deberán calibrarse y depurarse mediante la aplicación de más pruebas, aprovechando los recursos tecnológicos disponibles para su realización. Para mejorar la modelación realizada en el software ISLAB2000 es necesaria la calibración de parámetros y creación de bases de datos de todas las variables implicadas.

Se recomienda continuar esta investigación utilizando el HVS (Heavy Vehicle Simulator) recientemente adquirido por el LanammeUCR, para establecer correlaciones entre las pruebas de laboratorio y campo, y calibrar el modelo obtenido.

## 7. Referencias

1. Monge M, Sukti (2013). Evaluación del Comportamiento de la Fatiga de una Mezcla de Concreto MR-45 MPa con Adición de Polipropileno. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
2. Allen, J., & Badilla, G. (2011). Determinación de la carga de diseño para pavimentos flexibles en Costa Rica. XVI-CILA Congreso Latinoamericano de Asfalto. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C: AASHTO.
4. American Concrete Institute. (2002). State of Art Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI. ACI Fannington Hills, MI.
5. Anguas, P., Gómez, J., & Sesma, J. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
6. Austroads. (2012). Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life on Cemented Materials. Sidney: Austroads Ltd.
7. Boada, M., & Edwin, P. (2010). Trabajo de Grado. Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5 MPa para pavimento con fibras plásticas. Colombia: Universidad Pontificia Javeriana de Bogotá.
8. Calo, D. (2010). Jornada de actualización técnica: Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón. Diseño de Pavimentos Rígidos. Santiago del Estero: Dirección Nacional de Vialidad.
9. Chavarría, P. (2005). Trabajo Final de Graduación. Desarrollo de modelos de agrietamiento por fatiga en el concreto asfáltico en Costa Rica. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
10. Cornejo, N., & Velásquez, W. (2009). Trabajo de Graduación. Análisis Comparativo entre Métodos de Diseño de Estructuras de Pavimento Rígido. Antiguo Cuscatlán, El Salvador: Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".
11. FITESA. (2002). Boletín Técnico bt4. Fibras de polipropileno. Gravataí, Brasil.
12. Gillespie, T., Karamihas, S., Cebon, D., Sayers, M., Nasim, M., Hansel, W., et al. (1992). Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance. Michigan: UMTRI The University of Michigan Transportation Research Institute.
13. Huang, Y. H. (1993). Pavement Analysis and Design. New Jersey: Prentice Hall.
14. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. (2007). Concreto reforzado con fibras. IMCYC.
15. INV. (2007). I.N.V. E-414-07. Resistencia a la flexión del concreto: Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
16. Koss, I. (2001). Trabajo Final de Graduación. Concreto Reforzado con Fibras de Polipropileno. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
17. Maccaferri. (s.f.). Manual Técnico. Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo de Hormigón. Brasil: Maccaferri do Brasil Ltda.
18. Mendoza, C., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. Concreto y Cemento.
19. National Cooperative Highway Research Program. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP.
20. Neville, A. (1995). Properties of Concrete. John Wiley & Sons.
21. Porras, J. D. (2009). Trabajo Final de Graduación. Determinación de rangos de módulos resilientes para materiales constituyentes de la estructura de pavimentos existentes en Costa Rica, mediante el procedimiento de retrocálculo de módulos y ensayos dinámicos. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
22. Pujades, P. (2009). Tesis de grado. Durability of polypropylene fibre reinforced concrete. España: Universitat Politècnica de Catalunya.
23. Rao, S., & Roesler, J. (2005). Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results. University of Illinois.
24. Román, L. R. (2008). Tesis. Método Constructivo de Losas Cortas en Pavimentos de Concreto Hidráulico. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
25. Sánchez, A. (1985). Trabajo Final de Graduación. Diseño Experimental de un Concreto Reforzado con Fibras de Vidrio para Uso en Losas de Pavimento. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
26. Vega, E. (2012). Trabajo Final de Graduación. Elaboración de una guía de análisis estructural para pavimentos rígidos. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
27. Xargay, H., & Balzamo, H. (2010, Octubre). Hormigón Proyectado Reforzado con Macrofibras. HORMIGONAR, pp. 28-32.