

# Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas

## Fatigue behavior of a mixture concrete pavement MR-3.5MPa with the addition of plastic fibers

Boada Marcano, Mónica de los Ángeles<sup>1\*</sup> y Reyes Lizcano, Fredy Alberto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes  
Mérida 5101 - Venezuela

<sup>2</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.  
mboada@javeriana.edu.co\*

### Resumen

*Debido al deterioro que sufren actualmente los pavimentos, especialmente por fatiga, las nuevas tecnologías de pavimentos deberán estar orientadas a lograr nuevas redes de infraestructura vial que respondan eficientemente con el uso de materiales reciclables u otros que permitan construcciones sostenibles. En este estudio se utilizan fibras industriales (polipropileno) y reciclables (bolsas de leche y caucho) en porcentajes óptimos de adición a un concreto y se aplican modelos empíricos de fatiga para un posterior análisis y diseño de un pavimento rígido. Basados en los resultados y haciendo la comparación con un concreto tradicional, se obtiene que con el uso de fibras de polipropileno se reduce considerablemente el espesor, sobre todo en tráfico bajos y suelos con módulo de elasticidad mayores a 50 MPa. De la misma manera ocurre para las otras adiciones de fibras pero en menor relación que las fibras industriales, lográndose un mayor beneficio costo, el cual es proporcional a la reducción de espesores.*

**Palabras clave:** Pavimento de concreto, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la fatiga, fibras plásticas.

### Abstract

*Rigid pavements damage are due to vehicle dynamic loads, especially fatigue. The new pavement technologies must be designed to achieve new road infrastructure networks that respond efficiently to the use of recyclable materials or other structures that enable sustainable. In this study we used industrial fibers (polypropylene) and recyclables (milk bags and rubber) in optimal rates of addition to a concrete and empirical models fatigue are applied for further analysis and design of a rigid pavement. Based on the results and making comparison with traditional concrete, which is obtained with the use of polypropylene fibers, the thickness is greatly reduced, especially in low traffic and elastic modulus ground above 50 MPa. Likewise is true for other additions, but lesser fiber relationship industrial fibers, achieving a greater benefit cost, which is proportional to the thickness reduction.*

**Key words:** Concrete pavement, compressive strength, flexural strength, fatigue strength, plastic fibers.

### 1 Introducción

La preocupación acerca del deterioro de la infraestructura vial, radica en que las condiciones de servicio no son las óptimas, de hecho la mayoría de los pavimentos están catalogados como pavimentos en regulares y malas condiciones. Una razón importante del bajo nivel de servicio es debido a que estas carreteras se proyectaron, diseñaron y construyeron en su mayoría para tiempos de servicio muy

cortos (Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica, 2002).

Uno de los problemas recurrentes en el pavimento rígido es el ocasionado por el exceso repetitivo de cargas de tránsito (fatiga), que inducen a la desintegración del pavimento y el fracturamiento de la losa en grietas transversales, longitudinales, de esquina y de bloque, lo cual hace necesario un diseño más apropiado y realista del comportamiento a la fatiga del concreto (Altamirano, 2007;

Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica, 2002).

Pocos han sido los estudios relacionados con este tipo de antecedentes en los pavimentos rígidos, sin embargo, existen mayores investigaciones sobre el desempeño del concreto modificado con diferentes tipos de materiales como las fibras de acero (Laranjeira, et al., 2010), polímeros industriales (Barreda, Iaiani, & Sota, 2000; Rebeiz, Serhal, & Fowler, 1994; Su, 1995; Uomoto et al., 2002) y polímeros reciclables, dentro de los cuales se encuentran el caucho reciclado (Albano, et al., 2008; Witoszek, et al., 2004) y las bolsas de leche (Hernández & Torres, 2002).

Estas investigaciones resaltan las ventajas y desventajas que se pueden llegar a obtener con la adición de los polímeros en el concreto. Básicamente, estos garantizan una alta resistencia a la tensión y mayor resistencia a los ataques físico-químicos debido a sus componentes, por el contrario, son normalmente débiles en compresión. Dadas estas características, se han obtenido mezclas óptimas con el concreto, mejorando así sus propiedades y su resistencia a la tensión, logrando de esta forma un concreto con excelente maleabilidad, durabilidad y resistencia (Kardon, 1997). Sin embargo, dentro de los estudios hasta ahora realizados sobre el uso de estos compuestos en la mezcla, no se han hecho mediciones de fatiga que permitan determinar el comportamiento de su uso en los pavimentos.

Es por todo lo antes expuesto, y teniendo en cuenta los daños que se presentan en el concreto y sus principales causas, que se dio la necesidad de analizar el desempeño en fatiga del mismo, realizando comparaciones con y sin la adición de polímeros, entre ellos, el caucho, las bolsas de leche y las fibras industriales, en un porcentaje óptimo. A partir de este desarrollo, se estimaron los costos para cada una de las mezclas con el fin de obtener un diseño beneficioso en cuanto a resistencia, durabilidad y economía, utilizando algunos modelos, entre ellos: el Modelo Cero Mantenimiento, el Modelo Mecanicista y el Modelo PCA.

## 2 . Materiales y Métodos

### 2.1 Datos de Entrada

Para la elaboración del diseño de mezcla fue necesario realizar la caracterización de los materiales para el concreto. La calidad de los siguientes materiales está basada en el artículo 500-07 (Pavimento de Concreto Hidráulico) del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU-ET-2005, 2006).

El cemento utilizado fue Portland tipo III, proveniente de la empresa ARGOS, cuya densidad fue de 2,909 g cm<sup>-3</sup> y superficie específica de 4262 cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>.

Para el diseño de mezcla se empleó arena de río y grava proveniente de Tabio - Cundinamarca, a una distancia de 45 km aproximadamente de Bogotá. En la tabla 1 se muestran algunas características de los agregados, observándose

ciertos incumplimientos en el contenido de finos de la arena, la resistencia al desgaste y partículas planas y alargadas de la grava, lo cual podría influir en la resistencia y durabilidad del concreto. No obstante, por ser un material de uso común en la ciudad, fue utilizado en esta investigación, tomando en cuenta que se lograrían mejores resultados si se usan agregados de mejor calidad.

Tabla 1. Propiedades de los Agregados

Propiedad	Arena	Grava
Módulo de finura	2,5	-
Pasa tamiz # 200 (%)	7,58	0,2
Densidad Aparente (gcm <sup>-3</sup> )	2,520	2,374
Densidad SSS (gcm <sup>-3</sup> )	2,562	2,459
Densidad Nominal (gcm <sup>-3</sup> )	2,631	2,595
Absorción (%)	1,67	3,59
Suelta M.U.S(gcm <sup>-3</sup> )	1,922	1,319
Apsonada M.U.A. (gcm <sup>-3</sup> )	2,085	1,413
Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles (%)	-	53
Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (%)	-	0
Índice de aplanamiento (%)	-	15
Índice de alargamiento (%)	-	29

En cuanto a la calidad del agua empleada, se utilizó agua proveniente del acueducto de Bogotá con un pH de 7,91 y 86 ml/l de sólidos totales, cumpliendo con la norma I.N.V. E-417 de calidad del agua para concreto. Adicionalmente, se utilizaron aditivos plastificantes y acelerantes provenientes de la empresa TOXEMENT como el EUCON 37 y ACCELGUARD HE en cantidades de 0,75% y 2% en peso del cemento, respectivamente, esto con la finalidad de obtener una mayor trabajabilidad en el concreto con la adición de fibras y una temprana resistencia para la realización de los ensayos estáticos.

Para la adición de fibras industriales, se emplearon fibras de polipropileno (Fibromac 12) facilitadas por la empresa Maccaferri, cuya densidad es de 0,91 g cm<sup>-3</sup>. Dentro de las fibras reciclables se encuentran las de llantas de caucho, adicionadas en forma de tiras de 5cm x 0,4cm x 2 mm, con densidad de 0,93g cm<sup>-3</sup> y las bolsas de leche, suministradas por la industria Plastilene y cortadas en tiras de 40mm x 2mm, con densidad 0,93g cm<sup>-3</sup>.

### 2.2 Diseño de la Mezcla

Una vez caracterizado todo el material a emplear en la mezcla, se procedió a realizar el diseño mediante el método PCA (Kosmatka, et al., 2004). Para ello se obtuvo un diseño base, el cual no incluyó ningún tipo de fibras y 9 diseños secundarios, dentro de los cuales 6 son con la adición de 0,5%, 1% y 1,5% de fibras de polipropileno y bolsas de leche y los restantes 3 corresponden a una adición de caucho

de 0,7%, 1,4% y 2,1%, dichas adiciones fueron acordadas de acuerdo a estudios anteriores y criterio propio. En la tabla 2 se muestran las cantidades de materiales utilizados.

Tabla 2. Dosificación de la mezcla de concreto

Material	Cantidad
Agua (kg)*	194,47
Cemento (kg)*	465,47
Agregado grueso (kg)*	864,81
Agregado fino (kg)*	723,35
EUCON 37 (ml)	2749,6
ACCELGUARD HE (ml)	7216,6
Polipropileno 0,5% (kg)**	0,226
Polipropileno 1,0% (kg)**	0,452
Polipropileno 1,5% (kg)**	0,678
Bolsa de leche 0,5% (kg)**	0,226
Bolsa de leche 1,0% (kg)**	0,452
Bolsa de leche 1,5% (kg)**	0,678
Caucho 0,7% (kg)**	0,323
Caucho 1,4% (kg)**	0,647
Caucho 2,1% (kg)**	0,970

#### Observaciones

\*Estas cantidades corresponden a 1m<sup>3</sup> de concreto y varían de acuerdo a la humedad de los agregados, en este caso la humedad de la grava y arena fue de 0,87% y 4,52%, respectivamente.

\*\* Dosificación por volumen (3 cilindros y 3 viguetas). El asentamiento de diseño fue de 3”.

### 3 Ensayos de Laboratorio

#### 3.1 Ensayos Estáticos

Con los diseños de mezcla se elaboraron 3 probetas cilíndricas para ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad y 3 vigas para ensayos de resistencia a flexión, conforme a las normas INVIAS y ASTM.

Con la adición de fibras y plastificante a la mezcla, se obtuvo una reducción del 16,67% para la fibra de polipropileno únicamente, para las demás fibras el asentamiento fue controlado por el aditivo plastificante, siendo éste de 3”.

Para el concreto sin la adición de fibras, la resistencia a compresión a los 14 días fue superior a las muestras elaboradas con adiciones. De acuerdo a un análisis de resultados del conjunto de muestras para cada adición y tipo de fibras, las de mejor comportamiento por presentar menor disminución de su resistencia a compresión con respecto a la muestra testigo fueron las fibras de polipropileno; como siguiente opción, las tiras de caucho, las cuales tuvieron mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión, y como última opción, las tiras de bolsa de leche (ver figura 1).

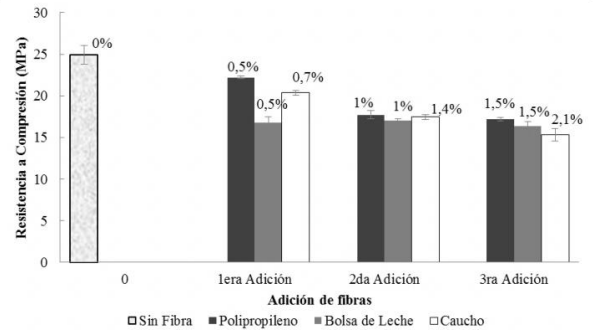


Fig. 1. Resistencia a compresión para cada porcentaje de fibra, a 14 días de edad.

En cuanto a las resistencias a flexión de los ensayos realizados, se observa en la figura 2 una mejora en dicha propiedad para las muestras con adiciones de fibras con respecto a la muestra testigo. Entre las 3 fibras utilizadas, las de mejor comportamiento a flexión a los 14 días fueron las bolsas de leche, siguiendo las de polipropileno y por último las de caucho. Sin embargo, se observó que a una edad avanzada las fibras de polipropileno mostraron mejores resultados con respecto a las otras adiciones, tanto en la resistencia a compresión como en la resistencia a flexión.

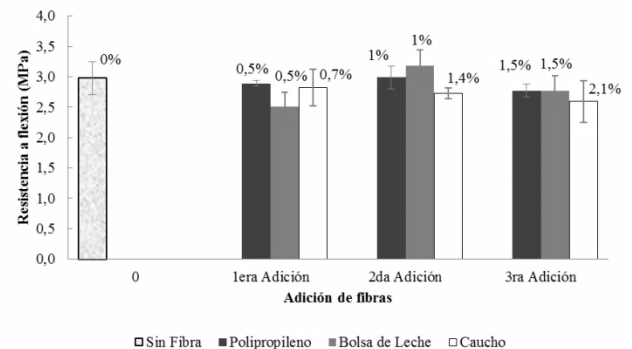


Fig. 2. Resistencia a flexión para cada porcentaje de fibra, a 14 días de edad.

Los módulos de elasticidad, al igual que la resistencia a compresión se redujeron en las muestras con adiciones de fibras (ver figura 3), caso contrario para 1,5% de bolsas de leche, el cual fue superior que la muestra testigo. Esto pudo deberse a muchas variables, algunas de ellas: mal vibrado de las probetas en su elaboración, relación agua-cemento, calidad de los agregados, especialmente, forma, textura, densidad, resistencia y porosidad. Por otro lado, el número reducido de probetas (n=3) para los ensayos también constituye un factor importante en los bajos valores de módulo, al presentar una mayor dispersión y variabilidad de los resultados con respecto al valor medio de cada tipo de fibra, obteniéndose una alta incertidumbre y menor precisión.

Teniendo en cuenta los análisis hechos sobre el comportamiento de todas las probetas ensayadas, se obtuvieron

los porcentajes óptimos, siendo estos de 1% para las fibras de polipropileno y tiras de bolsa de leche y 0,7% para las tiras de caucho, ya que la resistencia a flexión fue la propiedad con mayor ganancia, la que privó sobre los demás ensayos realizados y cuyos resultados fueron los que mejor comportamiento a flexión tuvieron con respecto a la muestra testigo.

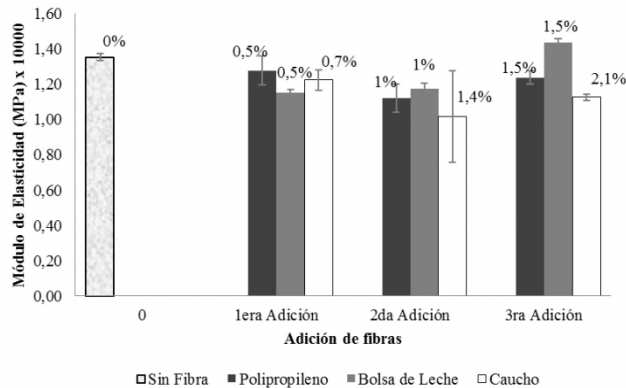


Fig. 3. Módulo de Elasticidad para cada porcentaje de fibra, a 14 días de edad.

### 3.2 Ensayos Dinámicos

Con los porcentajes óptimos para cada fibra se elaboraron 4 probetas cilíndricas correspondientes a los ensayos de módulos dinámicos de acuerdo a la norma AFNOR NF P18-400, para lo cual se empleó la Máquina Universal de Ensayo 793 (MTS). Sin embargo, para este caso, la norma fue adaptada en cuanto a la forma y/o dimensiones de las probetas, así como también la frecuencia del ensayo. Los ensayos se realizaron a una carga y amplitud de 25 kN, 200 ciclos y una frecuencia de 5 Hz. Asimismo, se hicieron ensayos de módulo estático a una carga de 60 kN y 300 segundos, con el fin de compararlos con los resultados de módulos dinámicos y descartar cualquier error en el ensayo.

Los resultados se muestran en la tabla 3.1, en el caso particular para las fibras de polipropileno los resultados para la probeta uno (1) fueron rechazados debido a que presentaban inconsistencias con respecto al resto de réplicas del mismo material.

Posteriormente, con los módulos dinámicos y las resistencias para cada tipo de fibra, se realizaron los modelos de fatiga de acuerdo a algunas leyes que han sido obtenidas mediante datos de campo y de laboratorio, las cuales relacionan el esfuerzo con el número de cargas hasta la falla. Dentro de dichos modelos se utilizaron: modelo de cero mantenimiento, modelo calibrado mecanicista y el modelo de fatiga PCA, por ser ellos los que presentan menores daños por agrietamiento (Anguas, et al., 2002; J Roesler&Rao, 2005).

Tabla 3. Módulos dinámicos y estáticos mediante la MTS y Máquina Universal para los porcentajes óptimos de cada fibra.

Muestra	Máquina MTS			Máquina Universal	
	Módulo Dinámico (MPa)	Módulo Estático (MPa)	Promedio Mód. Din. (MPa)	Promedio Mód. Est. (MPa)	Promedio Mód. Est. (MPa)
1 - CAU	11208,00	10487,50			
2 - CAU	12185,00	11036,50	11554,67	10764,50	11676,87
3 - CAU	11271,00	10769,50			
1 - PPL	-	-			
2 - PPL	11232,50	10482,00	10972,50	10338,25	12996,15
3 - PPL	10712,50	10194,50			
1 - BDL	10330,33	9738,90			
2 - BDL	10677,50	9872,65	10578,26	10034,52	11536,95
3 - BDL	10726,94	10492,00			
1 - SIN FIB	11621,00	10979,00			
2 - SIN FIB	12703,00	11953,00	12311,67	11569,67	13550,70
3 - SIN FIB	12611,00	11777,00			

## 4 Análisis de Resultados

Uno de los aspectos físicos observados en la elaboración de las probetas, fue la reducción del asentamiento en las fibras de polipropileno, por el hecho de que las fibras forman un mínimo entrelazado, tendiendo a afectar levemente la facilidad de trabajar la mezcla, dicho efecto puede atribuirse a la elevada superficie específica de tales fibras por unidad de volumen y por lo tanto su elevada capacidad de retener el agua por tensión superficial.

### 4.1 Ensayos Estáticos

En los ensayos de resistencia a compresión, se observó que la falla para el concreto sin fibras fue súbita, mientras que para las muestras con adiciones se produjo una mayor absorción de energía, ya que las mismas mantienen unidas las partículas en el concreto permitiendo mayores deformaciones y una mayor capacidad de soportar carga aun cuando se presenten agrietamientos.

De los resultados de resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad, a 14 días de edad, se obtiene la tabla 4, donde se hace una comparación de los resultados en términos de porcentaje con la muestra testigo.

De manera general, los valores de resistencia a compresión disminuyen con la adición de fibras; en las fibras de polipropileno dicho efecto puede deberse al aumento de porosidad generada por su incorporación a la mezcla. Para las tiras de caucho, la disminución pudo deberse a su propiedad de impermeabilidad, lo que ocasiona que sea más difícil su adherencia al concreto, afectando notablemente los esfuerzos de compresión, los cuales también pueden afectarse por la forma de las partículas de caucho en que fueron adicio-

nadas, generando vacíos y disminuyendo su densidad con respecto a la del concreto sin fibras. Finalmente, para la adición de bolsas de leche, se aprecia una disminución por ofrecer una mayor porosidad generada por la no adherencia en estado fresco de estas al concreto.

Tabla 4. Resistencias con respecto al concreto sin fibras, a 14 días de edad.

Fibra	% Adición	% Resistencias		% Módulo de elasticidad
		Compresión	Flexión	
Polipropileno	0,5	↓ 10,8%	↓ 2,8%	↓ 5,6%
	1,0	↓ 28,8%	↑ 0,4%	↓ 17,2%
	1,5	↓ 30,9%	↓ 6,8%	↓ 8,6%
Caucho	0,7	↓ 18,2%	↓ 5,2%	↓ 9,7%
	1,4	↓ 29,8%	↓ 8,4%	↓ 25,0%
	2,1	↓ 38,4%	↓ 12,8%	↓ 16,9%
Bolsa de leche	0,5	↓ 32,5%	↓ 15,5%	↓ 14,9%
	1,0	↓ 31,6%	↑ 6,8%	↓ 13,3%
	1,5	↓ 34,3%	↓ 6,8%	↑ 6,0%

↓: disminución      ↑: aumento

Por otra parte, la adición de fibras tuvo un aporte importante en la resistencia a flexión, lo cual se manifiesta en las de polipropileno y bolsa de leche correspondiente a los porcentajes de 1% de adición, siendo éstos los porcentajes óptimos. En las fibras de polipropileno, esto se produce porque ellas tienen una propiedad de elongación bastante representativa, lo que hace que soporten grandes cargas a tensión y sus esfuerzos se incrementen. Por otro lado, estas se dispersan perfectamente en todo el volumen del concreto, proporcionando a la matriz un armado en tres dimensiones en el que las fibras cosen las fisuras del hormigón formando un puente entre los agregados que permite la formación controlada de fisuras, y llevando al hormigón a un comportamiento dúctil después de la fisuración inicial.

Para las fibras de bolsa de leche, el aumento en la flexión es producido por el entrapado o formación de tejido dentro de la masa de concreto, haciéndolo más fuerte y aumentando la resistencia en más de una dirección. En cuanto a las tiras de caucho, su textura lisa podría estar impidiendo una buena adherencia al concreto, quizás sea por ello que su resistencia a flexión no haya sido la óptima.

Los módulos de elasticidad para las adiciones de fibras disminuyeron, lo que significa que se generan mayores deformaciones y aportan mayor capacidad de absorción de choques o impactos, debido al mayor número de vacíos generada por la distribución de las partículas. A los 28 días, el concreto con fibras tiende a ser menos rígido que un concreto sin fibras, esto quiere decir que menor será la probabilidad de que ocurra el agrietamiento del concreto por la adición de fibras.

El crecimiento del módulo de elasticidad es progresivamente menor que el crecimiento de la resistencia a la compresión del concreto, lo que indica una menor rigidez y menor fragilidad del concreto (Coró, 2002; Siddique&Naik, 2004), no obstante, esta disminución del módulo a mayor

edad también fue encontrada en otros estudios (Coró, 2002; Hernández-Olivares, et al., 2002). Los bajos resultados del módulo también pueden deberse a la calidad de los agregados, pues la resistencia, angulosidad y textura superficial de los agregados afecta el módulo de elasticidad del concreto (Anguas, et al., 2002).

#### 4.2 Ensayos Dinámicos

Los resultados de módulos dinámicos fueron sensibles a la aplicación de la carga de frecuencia, es decir, comparándolos con el módulos estáticos realizados en la misma máquina, los resultados para los módulos dinámicos fueron ligeramente mayores al aumentar la frecuencia del ensayo, dicho incremento es aproximadamente en promedio de 6,5% con respecto a los módulos estáticos, dichos resultados aumentan en promedio alrededor de 685 MPa, lo cual coincide con algunas investigaciones (Anguas, et al., 2002)

En el análisis de fatiga se generaron ajustes lineales a los modelos anteriormente citados con el fin de obtener las pendientes de fatiga para cada tipo de fibras y la muestra testigo (ver figuras 4, 5 y 6).

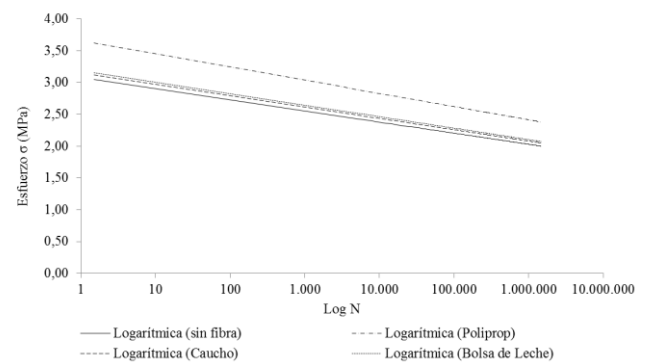


Fig. 4. Leyes de Fatiga (Modelo Cero Mantenimiento).

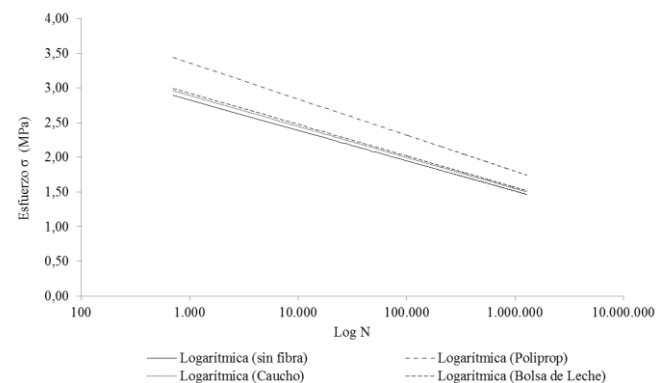


Fig. 5. Leyes de Fatiga (Modelo Calibrado Mecanicista).

Se observó que las fibras de polipropileno tienen mayor flexibilidad y por ende, mayor durabilidad en el tiempo que las demás. En segundo lugar, las fibras con mejor comportamiento a fatiga fueron las bolsas de leche, proporcio-

nando así una mayor admisibilidad en la base del pavimento, lo cual trae como consecuencia, menores espesores en el diseño. En último lugar, el caucho tuvo un mejor comportamiento en el concreto que sin adición de fibras, por presentar mayor pendiente de fatiga.

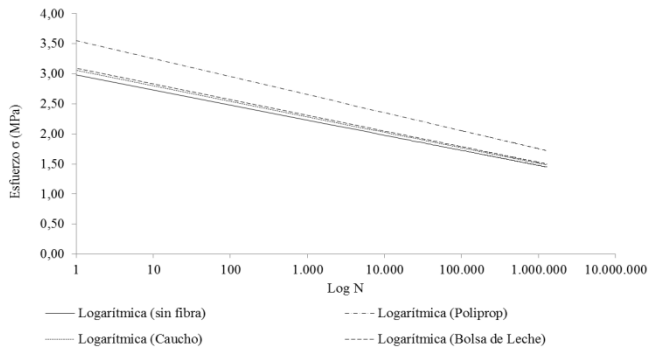


Fig. 6. Leyes de Fatiga (Modelo PCA).

En la tabla 5 se muestran las pendientes de fatiga para cada modelo y los esfuerzos de tracción para un millón de repeticiones ( $\sigma_6$ ), observándose que el modelo más conservador es el calibrado mecanicista, por considerar menores esfuerzos en la base del pavimento y, en consecuencia, proporcionar mayores espesores de las losas en relación a los otros modelos estudiados.

Tabla 5. Características de los diferentes concretos en fatiga.

Muestra	Cero Mantenimiento			Calibrado Mecanicista			PCA		
	b	$\sigma_6$	$S_N$	b	$\sigma_6$	$S_N$	b	$\sigma_6$	$S_N$
Sin Fibra	-0,076	2,029		-0,190	1,600		-0,109	1,477	
Polipropileno	-0,090	2,413		-0,226	1,940		-0,130	1,757	
Caucho	-0,078	2,078	1	-0,195	1,670	0,97	-0,112	1,513	0,99
Bolsa de Leche	-0,079	2,102		-0,197	1,690		-0,113	1,530	

## 5 Aplicaciones en el pavimento

### 5.1 Espesores de Pavimento

Para el diseño del pavimento, se seleccionó una calzada típica de 1 Km de longitud y sección transversal de 9.70 metros, compuesto por 2 carriles de 3,65 metros cada uno y bermas de 1,2 m. El programa utilizado para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones fue el CEDEM (programa desarrollado por el ingeniero Jairo Delgado Estévez de la Universidad de los Andes para el método racional de pavimentos). Adicionalmente se empleó sobre el concreto reforzado, en condición no ligada, un concreto pobre de 15 cm de espesor y sobre éste una subrasante con módulos de elasticidad en función de la capacidad de soporte estimada

del suelo a largo plazo y la incidencia de una capa tratada, de 20, 50 y 120 MPa, correspondiente a un suelo malo, regular y bueno, respectivamente (Reyes, 2003). El tráfico utilizado para el diseño fue de 1 millón (T2) y 5 millones (T4) de ejes de 13 ton.

Para un millón de ejes equivalentes de 13 toneladas, se observa en la figura 6 que en un suelo malo el espesor de la base de concreto con la adición de fibras de polipropileno y bolsa de leche no se ve afectado en el modelo cero mantenimiento, sin embargo, para las tiras de caucho se produce una reducción de hasta 6%, debido a que el caucho tuvo un mayor módulo dinámico, lo cual es favorable para que no ocurran mayores deformaciones que la admisible en el suelo de subrasante.

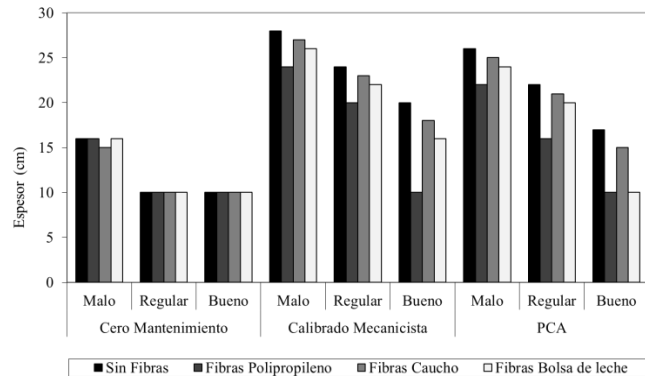


Fig. 7. Espesores de pavimento, tráfico bajo

En el modelo calibrado mecanicista se puede lograr una disminución de la base de concreto hasta 4 centímetros para las fibras de polipropileno, 3 compara las tiras de bolsas de leche y 2 cm para las de caucho. De la misma manera ocurre para el modelo PCA con las fibras de polipropileno, mientras que para las otras se puede obtener un 8% y 4% correspondiente a las de bolsa de leche y caucho, respectivamente.

Para un suelo regular y bueno se observa una reducción de espesores para el modelo calibrado mecanicista bastante considerable, siendo esta en las fibras de polipropileno de un 17% para un suelo regular y un 50% para suelo bueno. De manera similar ocurre para las tiras de bolsa de leche y caucho, ganando 1cm (tiras de caucho) y 2 cm de espesor (tiras de bolsa de leche) en un suelo regular y duplicándose este ganancia en un suelo bueno.

El modelo PCA, al aceptar admisibilidades en la base de concreto mayores que en el modelo anterior, se puede llegar a obtener una menor estructura de concreto, siendo mayor para una subrasante buena y con el uso de fibras de polipropileno en primer lugar, tiras de bolsa de leche como segunda opción y por último las tiras de caucho.

Por otro lado, para un mayor tránsito (T4) y un suelo malo, los modelos mecanicistas y PCA, arrojan una reducción de espesores entre un 3% y 6% para las fibras de poli-

propileno y 3% para las otras adiciones (ver figura 8). En un suelo regular, estos porcentajes se incrementan hasta un 10% para el polipropileno, un 7% para polietileno y 6% para caucho y a medida que el suelo de fundación se hace más duro, se obtienen mejores resultados a favor de la adición de fibras en el concreto.

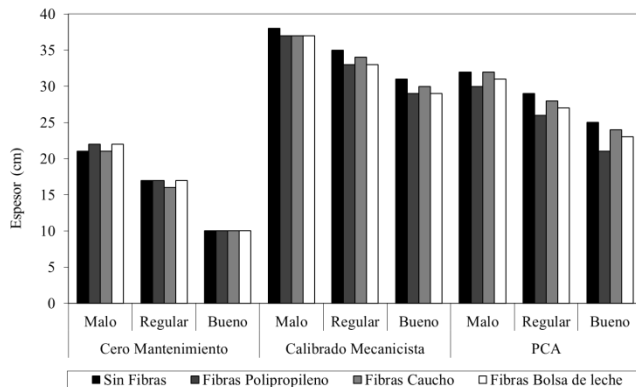


Fig. 8. Espesores de pavimento, tráfico alto

## 5.2 Presupuesto

La disminución de espesores provoca una disminución de costos en la construcción de un pavimento, observándose que con respecto al costo de un concreto sin fibras se obtienen mejores resultados en un suelo bueno, para el modelo PCA y las fibras de polipropileno, cuyo decremento es del 15,34%, 9,53% para las bolsas de leche y 4,07% para las tiras de caucho.

## 5.3 Beneficio Costo

Se hizo un análisis del beneficio, considerándolo como el dinero ahorrado con el uso de las fibras en el concreto, para lo cual se llevaron todos los flujos en valor presente neto, tanto de construcción como de mantenimiento. Como resultado se obtuvo que la mejor opción son las fibras de polipropileno, a pesar de su alto costo en comparación con las otras adiciones que corresponden a material reciclable.

## 6 Conclusiones

La adición de fibras en el concreto, a pesar de que no aportan resistencia a compresión, poseen una buena resistencia a flexión, siendo el porcentaje óptimo de adición de  $1\% \pm 0,07$  MPa para las fibras de polipropileno,  $0,7\% \pm 0,14$ MPa para tiras de caucho y  $1\% \pm 0,15$ MPa para tiras de bolsa de leche, dichas adiciones pueden considerarse cuando se requieran pavimentos económicos como en vías rurales, locales de bajo tráfico o estacionamientos.

La aproximación lineal del modelo calibrado mecanicista, es el más conservador de los modelos de fatiga empleados en esta investigación por considerar menores pen-

dientes generando así admisibilidades más pequeñas y espesores mayores.

Para el modelo calibrado mecanicista y PCA, las menores pendientes se obtienen con adición de fibras de polipropileno, en segundo lugar las tiras de bolsa de leche y finalmente las tiras de caucho, sin embargo, con el uso del modelo de cero mantenimiento no se logra reducción de espesores debido a las altas deformaciones en la subrasante.

Las mayores ganancias en los espesores de pavimento con la adición de fibras se dan en tráficos menores y suelos relativamente buenos y más aún cuando se utiliza el modelo mecanicista, de manera que los costos asociados disminuyen proporcionalmente con el espesor, siendo en este caso, las fibras de polipropileno la opción más económica, en segundo lugar las tiras de bolsa de leche y por último las tiras de caucho, alcanzándose una reducción mínima de 10% con respecto al concreto sin adición de fibras.

El mayor beneficio costo se obtiene con las fibras de polipropileno con un ahorro de 1/5 del costo del concreto sin adición de fibras para el modelo de fatiga PCA, un tráfico bajo y un suelo regular o bueno (50-120 MPa); para suelos malos, este valor disminuye a la novena parte del costo del concreto sin fibras.

## 7 Recomendaciones

Se recomienda mejorar las propiedades de los agregados en la elaboración de las mezclas de concreto para garantizar mejoras en cuanto a resistencias y módulos de elasticidad, así como también, pruebas previas en probetas de concreto para obtener la dosificación correcta de aditivos a la mezcla.

Por otra parte, realizar mayores probetas para ensayos estáticos y de fatiga del concreto garantizaría resultados más confiables y una mejor aproximación en las leyes de fatiga, en vez del uso de modelos empíricos realizados por otros autores. Es por ello que se propone que se elaboren cinco (5) muestras para cada tipo de adición y fibra por ensayo.

Es recomendable trabajar las tiras de caucho con una lechada de cemento o hidróxido de sodio para garantizar una mejor adherencia y mejor resistencia, o bien, trabajar el caucho en forma triturada.

Por otra parte, sería recomendable en el diseño de mezcla aumentar las cantidades de cemento y agua, sin variar la relación de agua-cemento, para obtener mejores resistencias que las alcanzadas en esta investigación y conseguir una mejor manejabilidad de la mezcla en estado fresco.

## Referencias

- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Bravo, A., Guevara, H., B, et al., 2008, Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamanos de partículas, Rev. Fac. Ing. UCV, Vol. 23, No. 1, pp. 67-75.
- Altamirano, L., 2007, Deterioro de pavimentos rígidos,

- Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.
- Anguas, P., Gómez, J., & Sesma, J., 2002, *Mecánica de materiales para pavimento*, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila. Publicación 192.
- Barreda, M., Iaiani, C., & Sota, J., 2000, Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: Tramo experimental de un pavimento de hormigón Paper presented at the Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga.
- Consejo de directores de carreteras de Iberia e Iberoamérica, 2002, *Iberia e Iberoamérica, Catálogo de Deterioros de Pavimentos Rígidos*, Vol. 12.
- Coró, A., 2002, *Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras PET* [tesis de grado], Universidad Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, A., et al., 2004, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, PCA.
- Hernández-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., & Witoszek, B., 2002, Static and dynamic behavior of recycled tire rubber-filled concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 1587-1596.
- Hernández, Y., & Torres, A., 2002, *Pavimentos drenantes en concretos con adiciones de tiras de plástico*, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- IDU-ET-2005, 2006, *Pavimentos de concreto hidráulico*, Capítulo 6, pp. 1-48.
- Kardon, J., 1997, Polymer-modified concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 9, No 2, pp. 85-92.
- Laranjeira, F., Grünwald, S., Walraven, J., Blom, C., Molins, C., & Aguado, A., 2010, Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete, *Materials and Structures*, pp. 1-19.
- Rebeiz, K., Serhal, S., & Fowler, D., 1994, Structural behavior of polymer concrete beams using recycled plastic, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp 150-165.
- Reyes, F., 2003, *Diseño racional de pavimentos*, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Roesler, J., & Rao, S., 2005, Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results, University of Illinois, Urbana-Champaign, pp 1-22.
- Siddique, R., & Naik, T., 2004, Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview, *Waste Management*, Vol. 24, No. 6, 563-569.
- Su, Z., 1995, *Microstructure of polymer cement concrete* [tesis de grado], Delft University Press, Delft, The Netherlands.
- Uomoto, T., Mutsuyoshi, H., Katsuki, F., & Misra, S., 2002, Use of fiber reinforced polymer composites as reinforcing material for concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp 191-209.
- Witoszek, B., Hernández, F., Alonso, M., Bollati, M., Parga, B., Barluenga, G., et al., 2004, *Hormigón con fibras de caucho de recuperación de neumáticos usados y de polipropileno diseño del firme de hormigón de caucho*, Paper presented at the VI Congreso Nacional de Firmes.

**Recibido:** 15 de octubre de 2011

**Revisado:** 18 de octubre de 2012

**Boada Marcano, Mónica de los Ángeles:** *Ingeniero civil de la UDO (2007). Magister en ingeniería civil con énfasis en infraestructura vial de la PUJ, Colombia (2011). Actualmente labora en Pequiven como especialista civil del Complejo Petroquímico Morón en importantes proyectos de la industria.*

**Reyes Lizcano, Fredy Alberto** *Ingeniero civil, M.Sc. Ph.D. Profesor Titular, Director, Maestría en Ingeniería Civil, Departamento Ingeniería Civil Cra. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: fredy.reyes@javeriana.edu.co.*



