



FACULTAD DE INGENIERIA

Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

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

Presentado por:

Mónica de los Ángeles Boada Marcano

Edwin Leonardo Pérez Niel

Director

Fredy Reyes Lizcano PhD.

Bogotá D.C.

Enero de 2011

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas”, desarrollado por los estudiante Mónica de los Ángeles Boada Marcano y Edwin Leonardo Pérez Niel, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

Fredy Alberto Reyes Lizcano
Director

Daniel Mauricio Ruiz Valencia
Jurado 1

Hugo Alexander Rondón Quintana
Jurado 2

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

Mónica de los Ángeles Boada Marcano

Edwin Leonardo Pérez Niel

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

DEDICATORIA

Primeramente a mi Dios por iluminarme y ayudarme en la realización y culminación de este proyecto que empezó como una nueva etapa de mi vida y de la cual estoy muy orgullosa. Y en segundo lugar, aunque no menos importante, a la familia más bella y única que tengo.

Mónica de los Ángeles Boada Marcano

Quiero dedicarle este trabajo A Dios que me ha dado la vida, la fortaleza y la luz para seguir adelante y poder terminar este proyecto de investigación, a mi familia por estar ahí cuando más los necesité; en especial a mi madre por su ayuda y constante cooperación. A mi esposa y en a mi hijo Juan Esteban Pérez Malagon por ser luz de inspiración y fuerza para mí.

Edwin Leonardo Pérez Niel

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a Dios por estar en mí porque gracias a Él pude llevar a cabo este proyecto exitosamente. A mis papas y mi hermano, que aún en la distancia, me dieron todo el apoyo que necesité para seguir adelante en esta nueva etapa. A mi director de tesis Fredy Reyes por brindarme sus conocimientos para realizar un trabajo de calidad. A la OEA por brindarme el apoyo económico para realizar esta maestría y a mi asesora de beca Paulina porque fue pilar fundamental en todo lo que necesité en este país y en el programa de estudio. A todo el grupo de laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad, por su tiempo y ayuda en todos los ensayos realizados. Por último, agradezco a mis compañeros de maestría y amigos colombianos y venezolanos, quienes me ayudaron en la realización de esta tesis y le dieron color tanto a mi vida personal como a este nuevo programa de estudio.

Mónica de los Ángeles Boada Marcano

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis, Dr. Freddy Reyes, por el apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a las sugerencias e ideas dadas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas.

Un trabajo de investigación es siempre fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos que corresponden a otras personas. En este caso mi más sincero agradecimiento al Sr. Carlos Mora, del área de pavimentos del laboratorio de la Universidad Pontificia Javeriana, con cuyo trabajo estaré siempre en deuda.

Gracias a mi familia, a mi madre y a mis hermanos, porque han sido un apoyo incondicional sin importar las circunstancias han estado ahí animándome.

Pero, sobre todo, gracias a mi señora y en especial a mi hijo, quien ha sido la fuente de inspiración para seguir formándome como persona y como profesional, agradecerles por su paciencia, comprensión y solidaridad con este programa, por el tiempo que me han concedido, un tiempo robado a la historia familiar.

Edwin Leonardo Pérez Niel

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 tráficos 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 claves: pavimento rígido, pavimento de concreto, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la fatiga, módulo de rotura, diseño de mezcla de concreto, polímeros, fibras industriales, fibras plásticas, polipropileno, bolsa de leche, polietileno, caucho.

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.

Keywords: Concrete pavements, compressive strength, flexural strength, fatigue strength, break modulus, mix design of concrete, polymers, industrial fibers, plastics fibers, polypropylene, milk bags, polyethylene, rubber.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN | 14 |
| 1.2 OBJETIVO GENERAL: | 15 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: | 15 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 30 |
| 3.1 DATOS DE ENTRADA | 30 |
| 3.1.1 CEMENTO | 30 |
| 3.1.2 AGREGADO FINO | 30 |
| 3.1.3 AGREGADO GRUESO | 31 |
| 3.1.4 AGUA | 34 |
| 3.1.5 ADITIVOS | 34 |
| 3.1.6 POLIPROPILENO | 35 |
| 3.1.7 CAUCHO | 35 |
| 3.1.8 BOLSAS DE LECHE | 36 |
| 3.2 DISEÑO DE MEZCLA | 36 |
| 4. ENSAYOS DE LABORATORIO | 38 |
| 4.1 ENSAYOS ESTÁTICOS | 38 |
| 4.2 ENSAYOS DINÁMICOS | 43 |
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 45 |
| 5.1 ENSAYOS ESTÁTICOS | 45 |
| 5.2 ENSAYOS DINÁMICOS | 53 |
| 5.3 LEYES DE FATIGA | 53 |
| 6. APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE UN PAVIMENTO | 56 |
| 6.1 ESPESORES DE PAVIMENTO | 56 |
| 6.2 PRESUPUESTO | 67 |
| 6.3 ANÁLISIS BENEFICIO – COSTO | 70 |
| 7. CONCLUSIONES | 72 |

| | |
|---|-----------|
| 8. RECOMENDACIONES..... | 73 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 74 |
| 10. ANEXO A..... | 78 |
| 10.1 PRESUPUESTO MODELO CERO MANTENIMIENTO, SUELO MALO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON..... | 78 |
| 10.2 PRESUPUESTO MODELO CALIBRADO MECANICISTA, SUELO MALO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.3 PRESUPUESTO MODELO PCA, SUELO MALO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.4 PRESUPUESTO MODELO CERO MANTENIMIENTO, SUELO REGULAR, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.5 PRESUPUESTO MODELO CALIBRADO MECANICISTA, SUELO REGULAR, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.6 PRESUPUESTO MODELO PCA, SUELO REGULAR, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON..... | 78 |
| 10.7 PRESUPUESTO MODELO CERO MANTENIMIENTO, SUELO BUENO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.8 PRESUPUESTO MODELO CALIBRADO MECANICISTA, SUELO BUENO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.9 PRESUPUESTO MODELO PCA, SUELO BUENO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 78 |
| 10.10 PRESUPUESTO MODELO CERO MANTENIMIENTO, SUELO MALO, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 78 |
| 10.11 PRESUPUESTO MODELO CALIBRADO MECANICISTA, SUELO MALO TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 78 |
| 10.12 PRESUPUESTO MODELO PCA, SUELO MALO, TRÁFICO TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON. | 79 |
| 10.13 PRESUPUESTO MODELO CERO MANTENIMIENTO, SUELO REGULAR, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 79 |
| 10.14 PRESUPUESTO MODELO CALIBRADO MECANICISTA, SUELO REGULAR, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 79 |
| 10.15 PRESUPUESTO MODELO PCA, SUELO REGULAR, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 79 |
| 10.16 PRESUPUESTO MODELO CERO MANTENIMIENTO, SUELO BUENO, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 79 |
| 10.17 PRESUPUESTO MODELO CALIBRADO MECANICISTA, SUELO BUENO, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 79 |

| | |
|---|-----------|
| 10.18 PRESUPUESTO MODELO PCA, SUELO BUENO, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 79 |
| 11. ANEXO B..... | 98 |
| 11.1 BENEFICIO- COSTO, MODELO CERO MANTENIMIENTO, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON..... | 98 |
| 11.2 BENEFICIO- COSTO, MODELO CALIBRADO MECANICISTA, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON. | 98 |
| 11.3 BENEFICIO- COSTO, MODELO PCA, TRÁFICO 1 MILLÓN EJES DE 13 TON..... | 98 |
| 11.4 BENEFICIO- COSTO, MODELO CERO MANTENIMIENTO, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON. | 98 |
| 11.5 BENEFICIO- COSTO, MODELO CALIBRADO MECANICISTA, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON..... | 98 |
| 11.6 BENEFICIO- COSTO, MODELO PCA, TRÁFICO 5 MILLONES EJES DE 13 TON. | 98 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA CADA PORCENTAJE DE FIBRA, A 14 DÍAS DE EDAD. | 39 |
| FIGURA 4.2. RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA CADA PORCENTAJE DE FIBRA, A 14 DÍAS DE EDAD. | 39 |
| FIGURA 4.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA CADA PORCENTAJE DE FIBRA, A 14 DÍAS DE EDAD. | 41 |
| FIGURA 4.4. ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA PORCENTAJES ÓPTIMOS DE FIBRAS. | 41 |
| FIGURA 4.5. ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA PORCENTAJES ÓPTIMOS DE FIBRAS. | 42 |
| FIGURA 4.6. ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA PORCENTAJES ÓPTIMOS DE FIBRAS. | 43 |
| FIGURA 5.1. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN LOS DIFERENTES PORCENTAJES ÓPTIMOS DE FIBRAS PARA DIFERENTES EDADES. | 48 |
| FIGURA 5.2. COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN EN LOS DIFERENTES PORCENTAJES ÓPTIMOS DE FIBRAS PARA DIFERENTES EDADES. | 49 |
| FIGURA 5.3. COMPARACIÓN DE MÓDULO DE ELASTICIDAD EN LOS DIFERENTES PORCENTAJES ÓPTIMOS DE FIBRAS PARA DIFERENTES EDADES. | 50 |
| FIGURA 5.4. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD: SIN FIBRA Y POLIPROPILENO. | 51 |
| FIGURA 5.5. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD: SIN FIBRA Y CAUCHO. | 51 |
| FIGURA 5.6. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD: SIN FIBRA Y BOLSA DE LECHE. | 52 |
| FIGURA 5.7. RELACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD A 28 DÍAS DE EDAD. | 52 |
| FIGURA 5.8. LEYES DE FATIGA (MODELO CERO MANTENIMIENTO). | 54 |
| FIGURA 5.9. LEYES DE FATIGA (MODELO CALIBRADO MECANICISTA). | 54 |
| FIGURA 5.10. LEYES DE FATIGA (MODELO PCA). | 55 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO FINO (ARENA DE RÍO)..... | 32 |
| TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO (GRAVA 1”) | 33 |
| TABLA 3.3. CALIDAD DEL AGUA PARA CONCRETO..... | 34 |
| TABLA 3.4. ESPECIFICACIONES EUCON 37 | 34 |
| TABLA 3.5. ESPECIFICACIONES ACCELGUARD HE | 35 |
| TABLA 4.6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS FIBROMAC 12..... | 35 |
| TABLA 4.7. DOSIFICACIÓN DISEÑO DE MEZCLA. | 37 |
| TABLA 4.1. ENSAYOS ESTÁTICOS DEL CONCRETO | 38 |
| TABLA 4.2. DESVIACIONES ESTÁNDAR PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN A 14 DÍAS. | 40 |
| TABLA 4.3. DESVIACIONES ESTÁNDAR PARA ENSAYOS A FLEXIÓN A 14 DÍAS. | 40 |
| TABLA 4.4. DESVIACIONES ESTÁNDAR PARA ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD A 14 DÍAS. | 40 |
| TABLA 4.5. MÓDULOS DINÁMICOS Y ESTÁTICOS MEDIANTE LA MTS Y MÁQUINA UNIVERSAL PARA LOS PORCENTAJES ÓPTIMOS DE CADA FIBRA..... | 44 |
| TABLA 5.1. RESISTENCIAS CON RESPECTO AL CONCRETO SIN FIBRAS, A 14 DÍAS DE EDAD. | 46 |
| TABLA 5.2. RESISTENCIAS CON RESPECTO AL CONCRETO SIN FIBRAS, A 28 DÍAS DE EDAD. | 50 |
| TABLA 5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES CONCRETOS EN FATIGA. | 55 |
| TABLA 6.1. CÁLCULO DE ESPESORES, ESFUERZOS Y ADMISIBILIDADES PARA NE= 1 MILLÓN Y SUELO MALO..... | 57 |
| TABLA 6.2. CÁLCULO DE ESPESORES, ESFUERZOS Y ADMISIBILIDADES PARA NE= 1 MILLÓN Y SUELO REGULAR. | 58 |
| TABLA 6.3. CÁLCULO DE ESPESORES, ESFUERZOS Y ADMISIBILIDADES PARA NE= 1 MILLÓN Y SUELO BUENO..... | 59 |
| TABLA 6.4. CÁLCULO DE ESPESORES, ESFUERZOS Y ADMISIBILIDADES PARA NE= 5 MILLONES Y SUELO MALO..... | 60 |
| TABLA 6.5. CÁLCULO DE ESPESORES, ESFUERZOS Y ADMISIBILIDADES PARA NE= 5 MILLONES Y SUELO REGULAR. | 61 |
| TABLA 6.6. CÁLCULO DE ESPESORES, ESFUERZOS Y ADMISIBILIDADES PARA NE= 5 MILLONES Y SUELO BUENO..... | 62 |
| TABLA 6.7. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO SIN FIBRAS (T ₁). | 64 |

| | |
|--|----|
| TABLA 6.8. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO (T_1). | 64 |
| TABLA 6.9. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO CON TIRAS DE CAUCHO (T_1). | 65 |
| TABLA 6.10. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO CON TIRAS DE BOLSA DE LECHE (T_1). | 65 |
| TABLA 6.11. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO SIN FIBRAS (T_4). | 65 |
| TABLA 6.12. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO (T_4). | 66 |
| TABLA 6.13. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO CON TIRAS DE CAUCHO (T_4). | 66 |
| TABLA 6.14. DIMENSIONAMIENTO DEL ACERO PARA EL CONCRETO CON TIRAS DE BOLSA DE LECHE (T_4). | 66 |
| TABLA 6.15. COSTOS EN PESOS COLOMBIANOS (2010) DE UN PAVIMENTO PARA UN TRÁNSITO T_1 Y DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS, SUELO Y MODELO. | 68 |
| TABLA 6.16. COSTOS EN PESOS COLOMBIANOS DE UN PAVIMENTO PARA UN TRÁNSITO T_4 Y DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS, SUELO Y MODELO. | 69 |
| TABLA 6.16. PORCENTAJE DE COSTOS CON RESPECTO A UN CONCRETO SIN FIBRAS. | 71 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema y Justificación

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).

Los problemas recurrentes en el pavimento rígido son ocasionados por los asentamientos, la mala capacidad portante del suelo, el mal diseño del pavimento, la dosificación de la mezcla, los problemas de drenaje, la deficiencia en su construcción y, especialmente, por el exceso repetitivo de cargas de tránsito (fatiga). Este último, induce 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).

Por otra parte las capas que conforman un pavimento obedecen a un factor económico, ya que cuando se determina el espesor de una capa lo ideal es darle el mínimo grosor de tal forma que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior, por ello la resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, sino también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo (Altamirano, 2007).

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.), polímeros industriales (Barreda, Iaiani, & Sota, 2000; Rebeiz, Serhal, & Fowler, 1994; Su, 1995; Uomoto, Mutsuyoshi, Katsuki, & Misra, 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, los polímeros garantizan una alta resistencia a la tensión y mayor resistencia a los ataques

físicos y químicos debido a sus componentes, por el contrario, son normalmente débiles en compresión. Dadas estas características, se obtuvieron mezclas óptimas con el concreto, mejorando así sus propiedades y su resistencia a la tensión, logrando de esta forma un concreto con excelente trabajabilidad, 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 presenta el concreto y sus principales causas, que se da 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 óptimo en cuanto a resistencia, durabilidad y economía, para esto se utilizaron algunos modelos entre los cuales están el Modelo Cero Mantenimiento, el Modelo Mecanicista y el Modelo PCA.

1.2 Objetivo General:

Determinar la resistencia mecánica de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas reciclables e industriales, sometida a cargas dinámicas (fatiga).

1.3 Objetivos Específicos:

1. Estimar el comportamiento de la resistencia a la fatiga con los porcentajes óptimos de tres tipos de fibras (bolsas de leche, caucho y fibras industriales) en el concreto MR-3.5MPa para pavimento.
2. Realizar y comparar los diseños mecanicistas del concreto MR-3.5MPa con y sin la adición de fibras reciclables e industriales.
3. Determinar los costos para una sección típica de calzada de 1 km para el concreto MR- 3.5 MPa con y sin la adición de fibras plásticas.

2. MARCO TEÓRICO

De acuerdo con la definición del ACI-American Concrete Institute, el hormigón reforzado con fibras es un hormigón hecho a partir de cementos hidráulicos, conteniendo áridos finos, o finos y gruesos, y fibras discretas discontinuas (American Concrete Institute, 1996), el cemento hidráulico se obtiene de la pulverización del clínker con la adición de una o más formas de sulfato de calcio, cuyas propiedades deben estar en concordancia con las normas ASTM C 150 (ASTM, 1998); los agregados (grueso y finos) de acuerdo a sus propiedades afectarán, en estado fresco la adherencia al cemento y trabajabilidad de la mezcla, y en estado duro su durabilidad y resistencia.

En las últimas cuatro décadas se han realizado estudios relacionados con la incorporación de polímeros al concreto, en forma de fibras sintéticas o reciclables, para entender su comportamiento en las estructuras. Actualmente las fibras sintéticas presentan grandes ventajas desde el punto de vista tecnológico por cuanto tienen un elevado módulo de elasticidad, una alta resistencia a tracción (400-900 MPa) y poco peso (900-1400 kg/m³) y su principal aplicación en el campo de los materiales de construcción es el control de la fisuración en hormigones y morteros, en algunos casos también se han empleado en el reforzamiento de concretos frente a la acción de impactos (Álvarez, 2009).

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, resistencia al impacto y reducción de la permeabilidad, contribuyen a una mayor duración del hormigón beneficiando a largo plazo los costos asociados por mantenimiento (Álvarez, 2009).

El concreto modificado con polímeros (PMC), a pesar de su alto costo (por encima de los US \$200/m³), puede justificarse utilizándose en estructuras marinas, puesto que por su alta impermeabilidad, reduce la absorción del agua en el concreto, además, no sólo se limita a estructuras marinas sino también para ambientes donde haya corrosión, abrasión y ciclos de hielo y deshielo (Gerwicfc, 1978).

Cuando se trabaja con adición del polímero Butadieno-Estireno en el concreto, se mejora la resistencia química del concreto y la trabajabilidad con una relación agua-cemento baja, lo cual contribuye a un aumento en la resistencia, durabilidad y a la vez garantiza menores costos (Kuhlman, 1991) citado por (Kardon, 1997).

La modificación del concreto con polímeros afecta su trabajabilidad en estado fresco, reducen la segregación, actúan como reductores de agua e incrementan significativamente el asentamiento (Chandra & Ohama, 1994; Su, 1995). Uno de los problemas con el uso de los polímeros en el concreto es su impermeabilidad, aunque reduce la presencia de soluciones dañinas en los poros del concreto, puede traer como consecuencia la formación de células de concentración y con ella la corrosión del acero (Cusson y Mailvaganam, 1996) citado por (Kardon, 1997).

También, se han realizado estudios en losas de concreto donde el acero es sustituido por fibras plásticas reforzadas (FRP) (Banthia, Al-Asaly, & Ma, 1995). En este estudio, se concluyó que las losas de concreto reforzadas con una red de FRP absorbían menos energía que para una losa de concreto con acero y que se consigue mejorar la capacidad de carga última y la energía de absorción, a pesar del bajo módulo de elasticidad y deformabilidad en la carga de rotura, las varillas de FRP, rejillas y las hojas han sido cada vez más utilizadas como material de refuerzo, tanto en hormigón armado, hormigón pretensado de hormigón, y la reparación y rehabilitación de estructuras de hormigón en la última década (Uomoto, et al., 2002).

Las dimensiones de fibras de polímeros, carbón y acero en el concreto reforzado influyen en los efectos de resistencia del concreto, sin embargo, las fibras de igual longitud tuvieron una imposición arbitraria ante todos los resultados obtenidos, de la misma manera que la distribución de los granos de arena tuvieron influencia en las propiedades mecánicas de las fibras de menor diámetro, las cuales no fueron consideradas como refuerzo (Chen & Chung, 1996). Zayat y Bayasi (1996) analizaron el efecto del látex en las fibras de concreto reforzado con carbón. Para ello utilizaron varios porcentajes de polímeros con una relación agua-cemento constante, de lo cual se obtuvo que bajo contenido de polímeros en la mezcla disminuían la resistencia a compresión, pero a mayor contenido de polímeros se obtenía un incremento en la resistencia a flexión y compresión, mejor resistencia al impacto y una mejor trabajabilidad, pero disminuía la resistencia a la tracción (Kardon, 1997).

La inclusión de polímeros en los concretos (PC) es reciente desde 1986, y aun más reciente la inclusión con resinas (monómero, pre polímero o ceniza volante), las cuales producen un material más resistente y duradero a diferencia del concreto tradicional, sin embargo, el rápido curado del concreto está limitado al alto costo que representan las resinas (Rebeiz, et al., 1994). En este estudio se utilizaron fibras de aglutinantes de resina de poliéster reciclado no saturado en vigas de concreto polimérico (PC), cuyo diseño óptimo de mezcla proporcionalmente por peso fue básicamente el siguiente: 10% resinas de poliéster, 45% grava seca, 35% arena seca y 10% de ceniza volante. Se realizaron ensayos de compresión, flexión y deflexión, en los cuales se observó principalmente que el PC en vigas proporcionaba mayor resistencia y mayor

ductilidad que el concreto reforzado utilizando cemento portland, lo cual hace que se obtenga menor acero en el concreto. El número de grietas en la viga también disminuyó mientras que el contenido de la fibra aumentó, sin embargo, cuando el contenido de fibra superaba el 1,3% en volumen, la resistencia al corte dejaba de aumentar. Otra de las conclusiones a las que se llegó con este estudio fue la baja permeabilidad, alta resistencia a la flexión y una excelente resistencia química del concreto polimérico; adicionalmente, su uso puede darse en aplicaciones que impliquen cargas dinámicas porque ayudan a las estructuras concretas para resistir fuerzas dinámicas más eficientemente.

Posteriormente, se utilizaron fibras poliméricas en contenidos de 0.45, 0.60, 1.20, 1.80 y 2.40 kg/m³, en dos tipos de concreto (normal y ligero), para lo cual se elaboraron especímenes cilíndricos para las pruebas de compresión y ruptura por tensión, especímenes prismáticos para conocer la resistencia a la flexión y discos cilíndricos para pruebas de resistencia a impactos, después de realizadas las pruebas, concluyeron que la adición de fibras (arriba de 2.40 kg/m³) no cambia significativamente las resistencias a la compresión, flexión y ruptura por tensión (Balaguru & Khajuria, 1996).

Los pavimentos fibrosos ofrecen ventajas como el aumento de resistencia a la tensión y fatiga, fisuración controlada, resistencia al impacto y durabilidad, con una dosificación de 40 kg/cm² de concreto con fibras, es posible reducir el espesor de las losas en un 30% y aumentar el espaciado entre las juntas por lo que su uso puede resultar atractivo a pesar de los altos costos (Zagaceta & Romero, 2008).

Más recientemente, se realizó un estudio con la adición de fibras plásticas (polipropileno) en el pavimento de concreto, utilizando fibras de polipropileno virgen, de 19 mm de longitud, distribuidas uniformemente en la mezcla de concreto en un grado de dosificación de 900g por metro cúbico, aproximadamente un volumen de fibra de 0.1%, para ello se realizaron probetas cilíndricas de 15x30 cm para los ensayos de resistencia compresión, módulo estático, tracción por compresión diametral y vigas de 10x10x30cm para los ensayos de flexión y tenacidad, a edades de 3, 7 y 28 días. Con la adición de fibras se aumentó el asentamiento y se produjo una disminución del peso unitario y el porcentaje de aire incorporado respecto del hormigón sin fibras. Asimismo no se encontraron fisuras por retracción y los valores promedio de la resistencia a la compresión a las edades de 7 y 28 días del hormigón con fibras fueron mayores que los obtenidos para esas mismas edades de ensayo en el hormigón sin fibras. De igual forma, los valores del módulo de rotura a flexión y tenacidad para el hormigón con fibras resultaron mayores que los obtenidos en el hormigón sin fibras para todas las edades de ensayo, de esta manera se obtuvo una mejor trabajabilidad del concreto fresco y se favoreció el comportamiento del pavimento a las sollicitaciones dinámicas del tránsito, aumentando su vida útil para una misma capacidad de tránsito (Barreda, et al., 2000).

Utilizando el mismo tipo de fibras, pero de longitud 20 mm con adiciones del 0.1 al 3% en peso del cemento, se realizaron probetas de dimensiones 40x40x160 mm tipo estándar, bajo condiciones de humedad relativa superior a 60% durante 48 horas a una temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$, con curado a los 7 y 28 días de edad, las cuales se ensayaron a compresión, flexión y mediante la microscopia electrónica se observó la microestructura del concreto, dicho estudio concluyó que la adición de fibras sintéticas como elemento de refuerzo de un mortero de cemento genera una disminución de los valores de resistencia a compresión, la cual es directamente proporcional al porcentaje de fibra, debido al aumento de la porosidad que se produce al adicionar las fibras, sin embargo, los valores de resistencia a flexión aumentan con la adición de fibras, siendo 2.5% el porcentaje óptimo de polipropileno (Rincón, Romero, Hernández-Crespo, Talero, & García Santos, 2004).

En las propiedades mecánicas que aportan las fibras de polipropileno al hormigón, se observa un notable aumento en su resistencia a compresión, tracción indirecta y flexo tracción, con lo cual se mejora la prolongación de las fisuras presentes en el concreto y se aumenta la energía de fractura debido al efecto cosido o costura (distribución uniforme) así llamado por el autor, que producen las fibras en el concreto, produciendo mayor ductilidad sobre todo con fibras de baja tenacidad y mayor elongación (F. Medina & Cifuentes, 2007).

De acuerdo con otras investigaciones (Álvarez, 2009), empleando macro fibras de polipropileno de longitud 55 mm y 40 mm con diámetro de 0.80 mm y 0.44 mm en dosificaciones de 2.28 kg/m^3 y 4.55 kg/m^3 , ensayadas en losas de hormigón de $3 \times 1 \times 0.2 \text{ m}$, se demostró la poca influencia que tienen las fibras en el hormigón, no obstante, la contribución de las fibras en una cuantía de $4,55 \text{ kg/m}^3$ y $2,28 \text{ kg/m}^3$ representa un aumento respecto al hormigón sin fibras de un 45,5% y 33% para resistencia a compresión, respectivamente. En el mismo sentido, la contribución de las fibras en una cuantía de $4,55 \text{ kg/m}^3$ representa un aumento respecto al hormigón sin fibras de 40% para flexotracción, sin embargo, para el mismo tipo de fibra, pero en una dosificación menor ($2,28 \text{ kg/m}^3$), se apreció que la adición de fibras apenas contribuye a mejorar dicha resistencia.

En cuanto a la carga admisible para una flecha dada, se observó que dicha carga aumenta con la dosificación siendo las losas con una dosificación de $4,55 \text{ Kg/m}^3$ las que admiten una mayor carga. La adición de fibras tiene como consecuencia la aparición de fisuras más curvadas, es decir, una clara ramificación y fragmentación de las fisuras, a medida que aumenta la cuantía de fibras, las fisuras presentan una mayor ramificación, lo cual conlleva a una mejora sustancial de la durabilidad del hormigón. Asimismo, se observa que a medida que se dobla la dosificación de fibras, se dobla también el porcentaje de energía absorbida (Álvarez, 2009).

Las micro fibras, se emplean en general para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no asume

funciones estructurales; también se utiliza para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente un elevado número de fibras por kg., especialmente, 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 (Álvarez, 2009).

En función de la dosificación, de las longitudes de fibra y de las propiedades de las mismas el hormigón adquiere propiedades distintas, acentuándose unas propiedades sobre otras en función de los distintos usos y aplicaciones del hormigón reforzado con fibras. El comportamiento de las fibras y las propiedades que éstas pueden aportar a la mezcla de hormigón dependen no solamente del volumen aportado sino de las características de las propias fibras (Álvarez, 2009).

Al mismo tiempo, se han realizado estudios al concreto incorporando fibras de polietileno. Tiras plásticas, provenientes de bolsas de leche, de dimensiones 2mm x 10mm y 4mm x 20mm, las cuales fueron adicionadas a un pavimento rígido con una estructura permeable, en diferentes porcentajes (de 0.025% hasta un 0.500% con respecto al peso de la mezcla). Las probetas realizadas para tal fin fueron ensayadas a compresión simple, tracción indirecta y módulo de elasticidad, dicho estudio indicó que la tira óptima para adicionar en los pavimentos porosos fue de 4 mm x 20 mm, en 0.100% y al realizar dicha adición se produce una disminución de la resistencia a compresión con respecto a la obtenida sin adición; mientras que la resistencia a flexión aumentó en porcentajes de hasta un 38% para las tiras de 4 mm x 20 mm, correspondiente a un porcentaje de adición de 0.10%, y de hasta un 14% para las fibras de 2 mm x 10 mm, correspondiente a un porcentaje de adición de 0.050%. Adicionalmente se observaron aumentos en la resistencia a la tracción indirecta y módulos de elasticidad en comparación con la mezcla testigo (Hernández & Torres, 2002).

De igual forma, el uso de fibras de polietileno 100% PET (polímero termoplástico) reciclables, provenientes de envases o garrafas para refrigerantes, de longitud 15.3 y 60 mm en contenidos de 1000, 3000, 5000 y 7000 g/m³, indicaron que las fibras de 15 mm de longitud con una mayor dosificación, tuvieron un mejor desempeño pero inferior a la mezcla de referencia. A pesar de que Naville (1997) afirma que a mayor resistencia mayor módulo, en estos resultados se presentó una contradicción, debida a algunas deficiencias de las lecturas de los resultados (Coró, 2002). En cuanto a la resistencia a tracción por compresión diametral, los mejores resultados se presentaron en las fibras de menor longitud y en las mezclas con mayor contenido de las mismas, mientras que para la resistencia a flexo tracción, se obtuvo un mejor comportamiento en las fibras de 30 mm de longitud (Coró, 2002).

Otro tipo de fibras usado en el concreto en varias investigaciones, es el caucho, algunos autores emplearon el uso conjunto de fibras de polipropileno al 0.1% en

volumen y fibras de caucho triturado reciclado de dimensiones 0.85x2.15cm, al 3.5% y 5% del volumen, manteniéndose constante las proporciones de los demás materiales que componen la mezcla de concreto (Hernandez-Olivares, Barluenga, Bollati, & Witoszek, 2002). Los ensayos realizados con estos materiales fueron de compresión, tracción directa, flexión y ensayos dinámicos de módulo a frecuencias de 5, 10 y 20 Hz, los resultados mostraron que con la adición de fibras de caucho la compresión disminuía de 40 MPa a 29 MPa con respecto a las muestras sin fibras. De la misma manera, se observó una disminución en la tracción indirecta, la cual pasaba de 2.8 MPa a 2.3 MPa.

Para las probetas ensayadas a flexión, la falla fue más dúctil que las de un concreto sin fibras, a pesar de que hubo una ligera disminución del esfuerzo, no hubo separación de los bordes de las grietas. Por otra parte, el módulo de young dinámico se incrementó significativamente con la frecuencia de carga pero se encontró que éste decrece a mayor temperatura. También se observó que los especímenes con mayor fracción de caucho disipan mayor energía que los que tienen poco contenido de fibras y la máxima disipación ocurre a una frecuencia de 20 Hz y bajas temperaturas (Hernandez-Olivares, et al., 2002).

El concreto elaborado con caucho triturado (partículas finas) muestra una resistencia mayor a la del concreto elaborado con tiras de caucho de dimensiones 25.4x25.4x5mm, 12.5x12.5x5mm y 6.25x6.25x5mm, sin embargo, éste último tiene mayor potencia para ser utilizado en el concreto, ya que el costo de este es 1/10 del costo del concreto con caucho triturado, adicional a esto, si se usa apropiadamente tienen una contribución potencial en la resistencia del concreto. (Huang, Li, Pang, & Eggers, 2004).

El porcentaje óptimo de caucho para el concreto es 20% del volumen de agregado grueso (Khatib and Bayomy 1999) citado por (Huang, et al., 2004), aunque para 15% del agregado grueso reemplazado por el caucho se observó una disminución de la resistencia a la compresión de 45%, y la resistencia a la tensión fue reducida en un 23%, aunque la tenacidad mejoro significativamente. El tamaño de las fibras de caucho tiene una gran importancia en la resistencia del concreto de caucho, ya que si se reduce el tamaño disminuye de gran manera la concentración esfuerzo-deformación, incrementando la resistencia (Huang, et al., 2004).

Cuando se sustituye totalmente el agregado grueso por caucho en forma de polvo, la resistencia a compresión se reduce en un 85% y la resistencia a la tracción en un 50%, pero si se sustituye solo el agregado fino en su totalidad, las reducciones pueden ser de un 65% y 50%, respectivamente, donde se observa falla dúctil y capacidad de absorción de energía. Mientras más áspera es la superficie del caucho, hay una mejor unión con la matriz del concreto, dando lugar a una mayor resistencia a compresión (Naik and Singh, 1991) citado por (Siddique & Naik, 2004).

La reducción de la resistencia a compresión del hormigón fabricado con agregados de caucho limita su uso en aplicaciones estructurales como carreteras o material de relleno de sub-bases, ya que posee algunas características deseables como su baja densidad, mayor resistencia al impacto y dureza, mejora de la ductilidad y mejor aislamiento acústico (Siddique & Naik, 2004). Al aumentar el contenido de caucho en la mezcla se genera un aumento en el contenido de aire, que a su vez reduce el peso unitario de la mezcla, sin embargo, esta disminución es insignificante cuando el contenido de caucho es más bajo que el 10-20% del volumen total de agregado (Khatib & Bayomy, 1999) citado por (Siddique & Naik, 2004).

Otro estudio de concreto elaborado con caucho reciclado (Albano, et al., 2008), donde el caucho fue sustituido por parte de la arena en porcentaje de 5% en peso, con tamaños promedio de las partículas mayores o iguales a 1,19 mm (grueso), menores a 1,19 mm (fino) y un tamaño al azar, demostró que la inclusión de caucho recuperado elimina la falla catastrófica del concreto reforzado y, a pesar de la disminución en las resistencias a compresión y flexión, se puede inferir que es factible la utilización de un 5% en peso de caucho en el concreto con tamaño de partículas al azar, ya que no deteriora significativamente las características del concreto, volviéndolo más liviano.

Los compuestos con los tamaños de partículas de caucho denominados fino y grueso mostraron una disminución bastante pronunciada al compararlos con los valores del concreto tradicional, siendo el porcentaje de disminución de 26 y 36%. Además, la utilización del tamaño de partícula denominado grueso del caucho en el compuesto produce un menor valor de la resistencia a la compresión al compararlo con el compuesto que contiene el caucho del tamaño denominado fino. En cambio, cuando el tamaño de partícula es el denominado al azar, el valor de esta propiedad, para el compuesto de concreto, es ligeramente inferior al del concreto tradicional, siendo la variación menor al 8% (Albano, et al., 2008).

En cuanto al módulo de elasticidad dinámico, los valores para el compuesto con caucho con tamaño al azar son muy similares al concreto tradicional, registrando una disminución del 1%. Por el contrario, cuando se empleaban partículas finas y gruesas, la disminución fue del 26% y 38%, respectivamente, trayendo como consecuencia un decremento en la velocidad de pulso y por ende en el módulo de elasticidad (Albano, et al., 2008).

De manera semejante (Khaloo, Dehestani, & Rahmatabadi, 2008), utilizando tiras de caucho gruesa y fina (gradación uniforme) como remplazo de arena y/o grava, encontrando que para adiciones de tiras de caucho superiores al 15%, reducen el asentamiento. El contenido de partículas de caucho en la mezcla también reduce el peso unitario del concreto de un 45%, 34% y 33% para las mezclas donde se remplazó parte del agregado grueso, fino y ambos, respectivamente, con tiras de caucho. En cuanto al módulo de elasticidad, en las muestras con concentraciones de caucho, las partículas se comportan como inclusiones débiles en el concreto

endurecido, por lo cual el módulo de elasticidad disminuye a medida que aumenta la cantidad de partículas de neumáticos en la mezcla.

En lo que respecta a la falla de los cilindros a compresión, se observó que para las mezclas que contenían tiras de caucho, la falla fue gradual ya que el hormigón se vuelve más flexible con una creciente sustitución de los agregados minerales por las partículas de neumáticos, los resultados de resistencias a compresión se redujeron significativamente con mayores cantidades de adiciones, por lo cual no se recomienda que los porcentajes de tiras de caucho sean superiores al 25%. En los ensayos de ultrasonido, se observó que la velocidad de ondas ultrasónicas se reduce significativamente con el contenido de caucho en la mezcla, lo que demuestra una composición porosa del concreto, haciéndolo un adecuado material para la amortiguación del sonido y otras ondas de energía, y puede ser utilizado en sitios ruidosos para servir como aislamiento acústico (Khaloo, et al., 2008).

De acuerdo con los resultados obtenidos (Witoszek, et al., 2004) se pudo establecer que la adición de caucho repercute en una mejora en la fisuración por retracción y disipación de energía elástica y una reducción del nivel sonoro del tráfico, sin embargo, aplicando las ecuaciones de Westergaard, se observa que el módulo de reacción del suelo tiene una gran influencia en el espesor de las losas de concreto, incluso con la adición de fibras de caucho. A menor módulo, los niveles de esfuerzo se incrementan y, por lo tanto, el espesor aumenta. De cierta forma, el mayor estado de esfuerzos se produce bajo un mayor módulo de Young, por lo que la adición de caucho puede ser apropiado porque presentan módulos más bajos.

Las implicaciones de las tiras de caucho reciclado en los pavimentos rígidos han generado ciertas formulaciones en el diseño de los mismos. En los ensayos a fatiga realizados en el anterior estudio (Witoszek, et al., 2004), para los cuales se cortaron probetas prismáticas de 5x6x25 cm provenientes de unas losas curadas, expuestas al ambiente por un año, se encontró para la muestra testigo, al 95% de confianza, el esfuerzo a flexión está dado según la ecuación 2.1 y para el módulo dinámico, este se mantiene mayormente constante en 25.11 GPa para 10^6 ciclos.

$$\sigma_{\text{flexión}} = -0.185 \log_{10}(\text{N}^\circ \text{ Ciclos}) + 5.095 \text{ (MPa)} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Para el 3.5% de caucho los resultados de fatiga se muestran en la ecuación 2.2 (95% de confianza) y, en cuanto al módulo de Young, se observó una tendencia creciente en función del número de ciclos dada por la ecuación 2.3.

$$\sigma_{\text{flexión}} = -0.268 \log_{10}(\text{N}^\circ \text{ Ciclos}) + 5.362 \text{ (MPa)} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$E_{3.5} = 1.886 \log_{10}(\text{N}^\circ \text{ Ciclos}) + 16.121 \text{ (GPa)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

En lo que respecta al 5% de caucho, las leyes de fatiga son descritas mediante la ecuación 2.4 de límite inferior de intervalo de confianza al 95%. Al igual que para

el 3.5% de caucho, el módulo de Young presenta la misma tendencia (ver Ecuación 2.5).

$$\sigma_{\text{flexión}} = -0.1154 \text{Log}_{10}(\text{N}^{\circ} \text{ Ciclos}) + 3.6128 \text{ (MPa)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$E_5 = 1.1133 \text{Log}_{10}(\text{N}^{\circ} \text{ Ciclos}) + 15.041 \text{ (GPa)} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Más adelante y basándose en el estudio anterior, se elaboraron probetas prismáticas de 5cmx5cmx25cm para ensayos a flexión dinámica (Hernández-Olivares, Barluenga, Parga-Landa, Bollati, & Witoszek, 2007), en porcentajes de 0, 3.5 y 5% y se expusieron al ambiente por un año. Se realizaron 3 puntos de fatiga en la máquina MTS-800 (0, 3.5 y 5% de caucho triturado) a una frecuencia de 10 Hz y carga al centro de la viga.

Los resultados fueron muy semejantes a los del primer estudio, con la diferencia de que se obtuvieron las deformaciones a flexión para los porcentajes de 0, 3.5 y 5% de caucho triturado. Para todas las muestras se presentó una relación entre el esfuerzo a flexión al 95% de confianza y el número de ciclos de carga del concreto. Las ecuaciones de las deformaciones están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{\text{flexión}} = -7.2 \text{Log}_{10}(\text{N}^{\circ} \text{ Ciclos}) + 212.0 \text{ (}\mu\text{def)} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$\varepsilon_{3.5; \text{flexión}} = -32.4 \text{Log}_{10}(\text{N}^{\circ} \text{ Ciclos}) + 340.8 \text{ (}\mu\text{def)} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\varepsilon_{5; \text{flexión}} = -23.1 \text{Log}_{10}(\text{N}^{\circ} \text{ Ciclos}) + 293.3 \text{ (}\mu\text{def)} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

El aumento de rigidez debido a la carga de fatiga supone un ligero aumento del espesor del pavimento con losas de concreto reforzado con caucho (RRFC) al 3.5% con respecto al concreto sin caucho de alrededor del 5%, sin embargo, puede ser compensada por el reciclaje de los neumáticos usados, el bajo costo de este tipo de residuos sólidos y una mejor capacidad de amortiguamiento (Hernández-Olivares, et al., 2007).

En la elaboración de los pavimentos es importante la calidad de los materiales a utilizar para que, de esta manera, se garantice una buena resistencia y durabilidad. De igual manera, entre los factores que afectan la fatiga en el concreto hidráulico se encuentra 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 y el tiempo de curado y edad del concreto (Anguas, Gómez, & Sesma, 2002).

Otros autores utilizan ciertos métodos para la determinación del límite de fatiga (Thomas, Carrascal, Setién, & Polanco, 2009), dentro de los cuales se encuentra el método de Locati y el método de Staircase, cada uno descritos a continuación:

Método de Locati: requiere la aplicación de trenes de ondas de carga, de compresión en este caso, de amplitud constante durante un número determinado de ciclos, transcurridos los cuales se incrementa la amplitud en una cantidad preestablecida conservando el resto de parámetros, dicho procedimiento se repite hasta que se produzca la rotura del concreto. Ésta metodología permite aproximar el intervalo de cargas donde se sitúa el límite de fatiga del hormigón estudiado, utilizando una única probeta, para ello, se fija el valor de la carga correspondiente al límite inferior y se varía, escalonadamente, el límite superior del intervalo de carga y en cada escalón de carga, se aplica un número estipulado de ciclos de fatiga.

Método de Staircase: consiste en realizar una fatiga monótona con los parámetros del escalón de rotura, aplicando el número de ciclos acordado, luego se repite el ensayo sobre otra probeta con otro nivel tensional. El segundo intervalo de ensayo estará determinado por el resultado del primero, si la primera probeta supera los N ciclos sin romper, se pasará a un intervalo superior con un aumento δ del valor superior de carga, manteniendo invariable la carga inferior.

Otro modelo utilizado con frecuencia por algunos autores (J Roesler & Rao, 2005), es el de Miner para predecir los daños por fatiga, el cual supone que los daños se acumulan linealmente en una base empírica (ver ecuación 2.9) y cuando llega a la unidad indica que los materiales deben fracturarse.

$$\text{Daño por fatiga} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde:

n_i = número de aplicaciones de cargas en condiciones actuales representada por i.

N_i = Número de aplicaciones de carga admisible hasta el fallo en condiciones representada por i.

Resultados experimentales (Holmen, 1982; Oh, 1991) citado por (Anguas, et al., 2002) han mostrado que el orden de aplicaciones de carga tiene un efecto significativo sobre el valor final de daño por fatiga, esto indica que el número total de ciclos de carga aplicados está influenciado por la secuencia de aplicación. Aun trabajando a niveles de esfuerzos muy bajos, el concreto puede fallar por fatiga si el número de ciclos de carga y descarga es lo suficientemente grande, por ello se considera que el concreto no tiene límite de duración de fatiga, a diferencia del acero de refuerzo que al hacerlo trabajar a niveles de esfuerzos menores del 50% de su resistencia a tensión, es capaz de resistir sin falla por fatiga un número

prácticamente infinito de ciclos de carga y descarga (Neville y Brooks, 1987) citado por (Anguas, et al., 2002).

Algunas leyes de fatiga 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 alguno de ellos se encuentran (J Roesler & Rao, 2005):

1. **Modelo de cero mantenimiento:** fue desarrollado con vigas de hormigón, los esfuerzos fueron calculados en la parte inferior de la viga. En este modelo se realizaron una serie de pruebas de laboratorio en vigas, generando de esta manera una curva de regresión de mínimos cuadrados, produciendo la siguiente ecuación definido por el índice de agrietamiento:

$$\text{LogN} = 17.61 - 17.61\text{SR} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde:

N: es el número permisible de carga para que ocurra la falla y

SR: es la relación de esfuerzos (σ/MR), siendo MR el módulo de ruptura del concreto a los 28 días.

2. **Modelo Calibrado mecanicista:** desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros (COE) con datos de campo de aeronaves y la Asociación Americana de Funcionarios Estatales de Carreteras (AASHO), con la falla definida como el 50% de losas agrietadas. Los esfuerzos fueron calculados en el borde de la losa utilizando elementos finitos y se expresa mediante la siguiente ecuación (Salsilli et al., 1993) citado por (Anguas, et al., 2002):

$$\text{LogN} = \left[\frac{-\text{SR}^{-5.367} \text{Log}(1-P)}{0.0032} \right]^{0.2276} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde:

P: es la probabilidad de agrietamiento.

3. **Modelo ERES/COE:** desarrollado por el cuerpo de ingenieros (COE) usando datos de aeronaves, definiendo una falla del 50% de agrietamiento en losas. Los esfuerzos son calculados en el borde de la losa usando el software H-51 y reducidos por un factor de 0.75 para tener en cuenta la transferencia de carga y las condiciones de los apoyos. El modelo viene dado por la ecuación 2.12.

$$\text{LogN} = 2.13\text{SR}^{-1.2}$$

Ecuación 2.12

4. **Modelo Foxworthy:** desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros (COE), igual que el modelo anterior se define el 50% de agrietamiento en las losas, los esfuerzos se calculan en el borde de la losa utilizando el programa de elementos finitos ILLI-losa; dicho modelo viene dado por la ecuación 2.13.

$$\text{LogN} = 1.323 \left(\frac{1}{\text{SR}} \right) + 0.588$$

Ecuación 2.13

Este modelo, al igual que el modelo ARES (Anguas, et al., 2002), predicen un tiempo de vida por fatiga más grande para esfuerzos altos en los pavimentos de concreto, y tiempos de vida por fatiga más cortos para esfuerzos bajos en los pavimentos de concreto, lo cual puede ser debido al no contemplar ciertos factores como los vacíos, el contacto parcial, alabeo, causando esfuerzos mayores, especialmente en pavimentos viejos.

5. **Modelo de fatiga PCA:** desarrollado usando vigas de hormigón, define la viga completamente fracturada, donde las tensiones de carga se calcularon en la parte inferior de la viga usando la ecuación de la viga de flexión. Este modelo utiliza relaciones similares al modelo de Cero Mantenimiento (ver ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16). No obstante, este modelo supone un límite de fatiga de 0.45 para pavimentos de concreto, es decir, que a un nivel de esfuerzos por debajo de 4.05, el daño por fatiga no ocurre. Los esfuerzos de cargas mediante La PCA fueron calculados en la parte inferior de la viga, usando las ecuaciones (Packard y Tayajbi, 1985) citado por (Anguas, et al., 2002):

$$\text{LogN} = 11.737 - 12.077\text{SR} \quad (\text{Para } \text{SR} \geq 0.55) \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$N = \left[\frac{4.2577}{\text{SR} - 0.4325} \right]^{3.268} \quad (\text{Para } 0.45 < \text{SR} < 0.55) \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$N = \text{no limitado} \quad (\text{Para } \text{SR} \leq 0.45) \quad \text{Ecuación 2.16}$$

La menor cantidad de daños por agrietamiento se presenta en el modelo de cero mantenimiento, el modelo mecanicista y el modelo PCA. El modelo de Foxworthy predice daños por fatiga superior a algunos órdenes de magnitud de la unidad. Por otro lado, el tamaño de la losa de concreto y la geometría, no están directamente tomados en cuenta en cualquiera de los modelos de la fatiga, a pesar del hecho

de que han demostrado ser un factor significativo en la resistencia a la fatiga de hormigón (J Roesler & Rao, 2005).

Los esfuerzos críticos en los análisis por fatiga, se presentan en las proximidades de los bordes y disminuyen a medida que se desplazan al interior de la losa. El análisis por erosión suele controlar el diseño de pavimentos para tránsito pesado que tengan pasajuntas, razón por la cual en análisis por fatiga no resulta importante (Zagaceta & Romero, 2008).

Otro parámetro importante para el análisis de daños por fatiga en el concreto es el módulo de ruptura. Se recomienda que para cada caso se desarrolle una relación entre la resistencia a compresión del concreto y este módulo. Una de estas relaciones es la desarrollada por Okamoto et. al (1991), citado por (Anguas, et al., 2002) expresada de la siguiente manera:

$$MR = (8.460 \times f'_c)^{0.5} + (3.311 \times RH) - 155.91 \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Donde;

MR : módulo de ruptura del concreto en psi.

f'_c : resistencia a compresión del concreto en psi.

RH: humedad relativa durante el tiempo de curado en %.

Otro estudio propone otra relación entre la resistencia a compresión y el módulo de ruptura, entre un rango de 8 a $10\sqrt{f'_c}$. Mientras que la ACI, recomienda que dicho factor este en el rango de 6.5 (Anguas, et al., 2002).

Los diseños de pavimentos presentan dos tipos de falla durante la vida útil de la estructura, una funcional y otra estructural. La falla funcional se refleja cuando el pavimento no brinda un paso seguro sobre él, lo que provoca que no sea posible transportar cómoda y seguramente a los vehículos. La falla estructural está relacionada con la pérdida de cohesión de la estructura de pavimento por completo o por alguna de sus capas lo que repercute que éste no puede soportar las cargas a la que está sometido (L. Medina, Pérez, Crespo, & AEPO, 2002).

No obstante la falla estructural en los pavimento se presenta cuando los materiales que conforman la estructura son sometidos a repeticiones de carga por acción del tránsito, induciendo a un agrietamiento estructural el cual está relacionado con la deformaciones o tensiones horizontales por tracción en cada capa de la base, de manera que el sentido de la falla está relacionada con la deformación o tensión que se produce con el número de repeticiones admisibles; a esto se le denomina falla por fatiga a causa de las repeticiones de carga (L. Medina, et al., 2002).

Tal como se mencionó anteriormente, la principal causa de la falla estructural en un pavimento se produce por fatiga. Para determinar el comportamiento de la fatiga en el concreto, usualmente se utiliza la siguiente ecuación (Reyes, 2003), basada en la curva de Wohler:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 - B \times \text{Lg}N \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Donde;

σ = Esfuerzo aplicado

σ_0 = Esfuerzo de ruptura

B = Pendiente de la ley de fatiga

N = Tránsito – Número de ejes equivalentes (Generalmente, para las leyes de fatiga se utiliza 10^6 ciclos de carga).

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 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 Nacional de Vías.

3.1.1 Cemento

El cemento utilizado fue Portland tipo III, proveniente de la empresa ARGOS. Los ensayos realizados al cemento fueron los de densidad y finura, basados en la norma I.N.V. E-307 e I.N.V. E-302, respectivamente, éste último mediante el método del aparato de Blane. Los resultados de dichos ensayos fueron de 2.909 g/cm³ para la densidad y 4262 cm²/g para la finura del cemento.

3.1.2 Agregado Fino

Para el diseño de mezcla se empleó arena de río proveniente Tabio - Cundinamarca, a una distancia de 45 km aproximadamente de Bogotá. Dentro de los ensayos realizados a la arena se encuentran: granulometría, contenido de finos, materia orgánica, gravedad específica, absorción y peso unitario, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.1.

En dicha tabla se observa que la granulometría no cumple en algunos tamices, lo cual podría influir en la resistencia del concreto. Sin embargo, es un agregado que se encuentra en ferreterías y que normalmente es utilizado en la ciudad de Bogotá.

3.1.3 Agregado Grueso

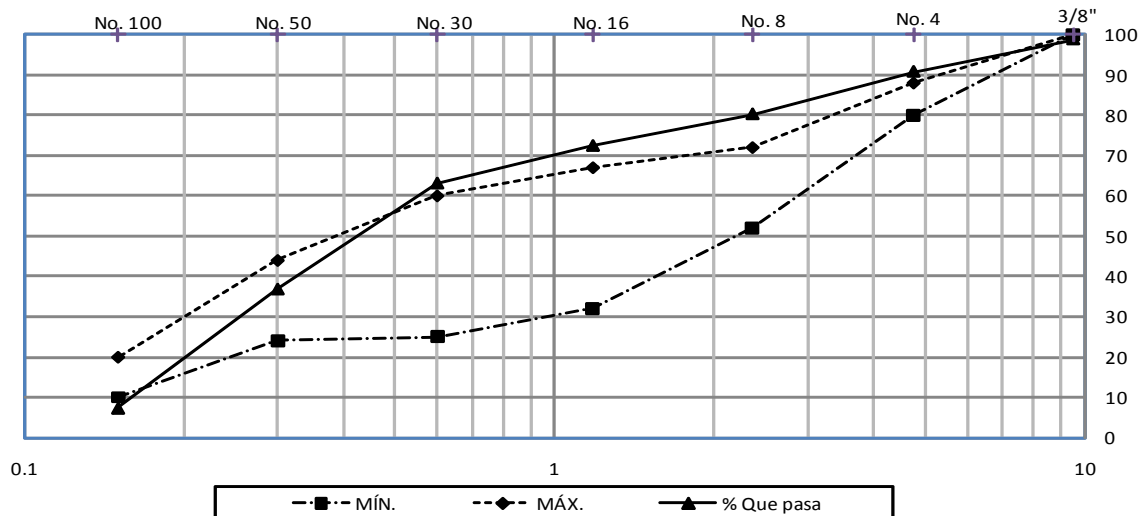
En cuanto a la grava utilizada para el desarrollo del proyecto, ésta proviene de Tabio – Cundinamarca, al igual que la arena. Los ensayos realizados para la grava fueron los siguientes: granulometría, contenido de arcilla, gravedad específica, absorción, peso unitario, resistencia al desgaste, caras fracturadas, partículas planas, alargadas ó planas y alargadas. Los resultados de dichos ensayos se presentan en la tabla 3.2.

Así como se presentó en el agregado fino el no cumplimiento de ciertos resultados en su caracterización, en el agregado grueso ocurrió lo mismo en los ensayos de granulometría, resistencia al desgaste y partículas planas, alargadas y planas y alargadas. Dicho incumplimiento afectan las resistencias del concreto y por lo tanto su durabilidad. No obstante, por ser un material de uso común en la ciudad, fue utilizado en esta investigación, tomando en cuenta que se podrían conseguir mejores resultados con agregados de mejor calidad.

Tabla 3.1. Características del Agregado fino (Arena de Río).

| Análisis Granulométrico (I.N.V. E-213) | | | | | | | | |
|--|---------|---------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------------------|------|---------------|
| Peso total (g): | | 437.8 | | | | | | |
| Tamiz in | Peso mm | Peso Retenido | Porcentaje Retenido | Porcentaje Acumulado | Porcentaje que pasa | Especificación interna | | Observaciones |
| | | | | | | MIN. | MÁX. | |
| 3/8" | 9.5 | 5.3 | 1.2 | 1.2 | 98.8 | 100 | 100 | No cumple |
| No. 4 | 4.75 | 35.1 | 8.0 | 9.2 | 90.8 | 80 | 88 | No Cumple |
| No. 8 | 2.36 | 46.0 | 10.5 | 19.7 | 80.3 | 52 | 72 | No Cumple |
| No. 16 | 1.18 | 34.3 | 7.8 | 27.6 | 72.4 | 32 | 67 | No Cumple |
| No. 30 | 0.6 | 40.7 | 9.3 | 36.9 | 63.1 | 25 | 60 | No Cumple |
| No. 50 | 0.3 | 114.9 | 26.2 | 63.1 | 36.9 | 24 | 44 | Cumple |
| No. 100 | 0.15 | 129.3 | 29.5 | 92.6 | 7.4 | 10 | 20 | No cumple |
| No. 200 | 0.075 | 28.5 | 6.5 | 99.2 | 0.8 | | | |
| Fondo | | 3.7 | 0.8 | 100.0 | | | | |
| Total | | 437.8 | | | | | | |
| Módulo de Finura: | | | | | 2.50 | 2.8 | 3.6 | Cumple |

Curva Granulométrica

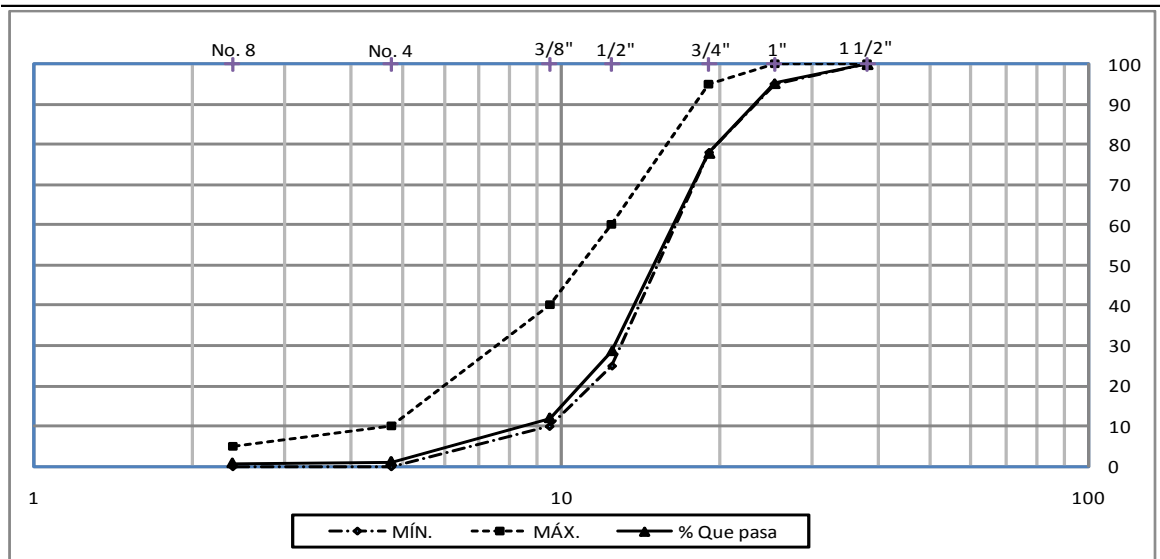


| Contenido de Material Fino (I.N.V. E-214) | | | | |
|--|-------|---------------------------------------|------------------------|-----------|
| % Pasa Tamiz 200: | 7.58 | Especificación interna: | < 3.0 % | No cumple |
| Contenido de materia orgánica (I.N.V. E – 212) | | | | |
| % Pasa Tamiz 200: | 0.0 | Especificación interna: | Igual a muestra patrón | Cumple |
| Gravedad específica y absorción de agregados finos (I.N.V. E-222). | | | | |
| Densidad Aparente g/cm ³ : | 2.520 | Densidad Norminal g/cm ³ : | 2.631 | |
| Densidad SSS g/cm ³ : | 2.562 | Absorción (%) : | 1.67% | |
| Peso Unitario (I.N.V. E-217) | | | | |
| Suelta (M.U.S) g/cm ³ : | 1.922 | | | |
| Apisonada (M.U.A.) g/cm ³ : | 2.085 | | | |

Tabla 3.2. Características del Agregado Grueso (Grava 1").

| Análisis Granulométrico (I.N.V. E-213) | | | | | | | | |
|--|-------|------------|------------|------------|------------------------|------|---------------|-----------|
| Peso total (g): | | 2371.4 | | | | | | |
| Tamiz | Peso | Porcentaje | Porcentaje | Porcentaje | Especificación interna | | Observaciones | |
| in | mm | Retenido | Retenido | Acumulado | que pasa | MIN. | | MÁX. |
| 1 1/2" | 38.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 | Cumple |
| 1" | 25.4 | 112.4 | 4.7 | 4.7 | 95.3 | 95 | 100 | Cumple |
| 3/4" | 19.1 | 412.8 | 17.4 | 22.1 | 77.9 | 78 | 95 | No cumple |
| 1/2" | 12.5 | 1167.7 | 49.2 | 71.4 | 28.6 | 25 | 60 | Cumple |
| 3/8" | 9.51 | 396.6 | 16.7 | 88.1 | 11.9 | 10 | 40 | Cumple |
| No. 4 | 4.76 | 257.7 | 10.9 | 99.0 | 1.0 | 0 | 10 | Cumple |
| No. 8 | 2.38 | 8.9 | 0.4 | 99.4 | 0.6 | 0 | 5 | Cumple |
| No. 200 | 0.075 | 11.3 | 0.5 | 99.8 | 0.2 | | | |
| Fondo | | 4.0 | 0.2 | 100.0 | | | | |
| Total | | 2371.4 | 100 | | | | | |

Curva Granulométrica



Contenido de Arcilla (I.N.V. E-211)

| | | | | |
|---------------------|-----|-------------------------|----------|--------|
| % Partículas finas: | 0.2 | Especificación interna: | < 0,25 % | Cumple |
|---------------------|-----|-------------------------|----------|--------|

Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (I.N.V. E-223)

| | | | |
|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| Densidad Aparente g/cm ³ : | 2.374 | Densidad Norminal g/cm ³ : | 2.595 |
| Densidad SSS g/cm ³ : | 2.459 | Absorción (%): | 3.59% |

Peso Unitario (I.N.V. E-217)

| | |
|--|-------|
| Suelta (M.U.S) g/cm ³ : | 1.319 |
| Apisonada (M.U.A.) g/cm ³ : | 1.413 |

| | | | | |
|--|-----|-------------------------|-----|-----------|
| Resistencia al desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles (I.N.V. E – 218): | 53% | Especificación interna: | 40% | No Cumple |
|--|-----|-------------------------|-----|-----------|

| | | | | |
|--|----|-------------------------|-----|--------|
| Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (I.N.V. E – 227): | 0% | Especificación interna: | 60% | Cumple |
|--|----|-------------------------|-----|--------|

Partículas planas, alargadas, o planas y alargadas (I.N.V. E – 240):

| | | | | |
|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-----------|
| Índice de aplanamiento: | 15% | Especificación interna: | 10% | No Cumple |
| Índice de alargamiento: | 29% | Especificación interna: | 10% | No Cumple |

3.1.4 Agua

El agua empleada proviene del acueducto de Bogotá y tiene las siguientes características de acuerdo a la norma I.N.V. E-417 de calidad del agua para concreto (Ver tabla 3.3)

Tabla 3.3. Calidad del agua para concreto.

| Sólidos Totales Secados a 103 - 105°C (SM 2540B) | | | | | | |
|--|------------------|----------------|----------------------|-----------|----------------|---------------|
| Muestra | Peso Inicial (g) | Peso Final (g) | Volumen muestra (ml) | Resultado | Especificación | Observaciones |
| 1 (T-119) | 72.3218 | 72.3261 | 50.0000 | 86.0000 | < 500 ml/l | Cumple |

| pH Potencial de Hidrógeno (SM 4500-H ⁺ B) | | | | |
|--|------|----------------|------|---------------|
| Muestra | pH | Especificación | | Observaciones |
| | | MIN. | MÁX. | |
| 1 (T-119) | 7.91 | 5.5 | 8.5 | Cumple |

Observaciones Generales

El agua a simple vista no posee contenido de materia orgánica

3.1.5 Aditivos

Para obtener una mayor trabajabilidad en el concreto con la adición de fibras y una temprana resistencia para la realización de los ensayos estáticos, se emplearon plastificantes y acelerantes, respectivamente. Los aditivos empleados provienen de la empresa TOXEMENT.

EUCON 37 es un aditivo reductor de agua de alto poder para hormigón el cual cumple con la norma ASTM C-494 tipo A y F o ICONTEC 1299. Para obtener un concreto más fluido la dosificación varía entre el 0,5% al 1.0% del peso del cemento usado en la mezcla, en este caso se usó el promedio equivalente a 0.75%. En la tabla 3.4 se muestra la información técnica del producto.

Tabla 3.4. Especificaciones EUCON 37

| Especificaciones | |
|-------------------------|----------------------------|
| Apariencia : | Líquido de baja viscosidad |
| Color : | Café |
| Contenido de Cloruros : | Ninguno |
| Densidad : | 1.185 kg/l +/- 0.01 kg/l |
| % Sólidos : | 37.5% +/- 1.5% |
| PH : | 9 +/- 1 |

Fuente: www.toxement.com.co (EUCLID-TOXEMENT).

ACCELGUARD HE es un aditivo acelerante de fraguado para concreto y mortero. Su uso genera resistencias mecánicas tempranas y finales más rápidamente, en conformidad con las normas ASTM C-494 Tipo C e ICONTEC 1299. La dosificación de este aditivo puede variar de acuerdo con la temperatura ambiente y las condiciones propias de cada trabajo (0.5 – 3 % del peso del cemento). Para esta investigación se empleó el 2% del peso del cemento de acuerdo con las recomendaciones propias del fabricante. A continuación se muestra información técnica de este aditivo (ver tabla 4.5).

Tabla 3.5. Especificaciones ACCELGUARD HE

| Especificaciones | |
|-------------------|--------------------------|
| Densidad : | 1,29 kg/l +/- 0,015 kg/l |
| Apariencia : | Líquido de color ámbar |
| Contiene cloruros | |

Fuente: www.toxement.com.co (EUCLID-TOXEMENT).

3.1.6 Polipropileno

Las fibras de polipropileno empleadas como adición en el concreto, son provenientes de la empresa MaccaFerri (FibroMac 12). Por lo general, son empleadas para el refuerzo de concretos y morteros con el fin de controlar la fisuración por retracción. En la tabla 4.6 se observan algunas características técnicas del producto.

Tabla 4.6. Características Técnicas FibroMac 12

| Propiedades Físicas | |
|--------------------------------------|---------------|
| Diámetro (µm) | 18 |
| Sección | Circular |
| Largo (mm) | 12 |
| Alargamiento (%) | 80 |
| Materia prima | polipropileno |
| Peso Específico (g/cm ³) | 0.91 |
| Propiedades Mecánicas | |
| Temperatura de fusión (°C) | 160 |
| Resistencia a la tracción (MPa) | 300 |
| Módulo de Young (MPa) | 3000 |

Fuente: www.maccaferri.com (Maccaferri América Latina).

3.1.7 Caucho

Para la adición de fibras de caucho, se utilizaron desechos de llantas de camiones, las cuales fueron cortadas en tiras de 5 cm de largo, 0.4 cm de ancho y

calibre 2 mm. Para ello se fabricó un troquel con dichas dimensiones y se empleó la máquina troqueladora para su corte. El peso específico de dicho material es 0.93 g/cm^3 .

3. 1.8 Bolsas de Leche

Las bolsas de leche son otro tipo de fibras adicionadas al concreto. El material con el cual se realizan estas bolsas es polietileno de baja densidad (LDPE ó PDBD), las cuales fueron suministradas por la industria Plastilene, son adicionadas al concreto en forma de tiras de 2 mm de ancho y 40 mm de largo y tienen una densidad específica de 0.93 g/cm^3 . El uso de desechos de bolsas de leche puede ser importante para la obtención de buena resistencia a tensión.

3.2 Diseño de Mezcla

Una vez caracterizado todo el material a emplear en la mezcla, se procedió a realizar el diseño mediante el método PCA (Diseño PCA, 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 con el director de tesis. En la tabla 4.7 se muestran las cantidades de materiales utilizados.

Tabla 4.7. Dosificación diseño de mezcla.

| 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 1m³ 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).

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1 Ensayos Estáticos

Posteriormente, con los diseños de mezcla se elaboraron las probetas (cilindros y vigas) para realizar los ensayos estáticos. Dichos ensayos se presentan en la tabla 4.1 de acuerdo a las normas INVIAS y ASTM.

Tabla 4.1. Ensayos Estáticos del concreto

| Ensayo | Norma |
|---|--------------|
| <ul style="list-style-type: none">Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. | I.N.V. E-410 |
| <ul style="list-style-type: none">Resistencia a la flexión del concreto. Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz. | I.N.V. E-414 |
| <ul style="list-style-type: none">Módulo de elasticidad del concreto. | ASTM C469 |

El asentamiento de diseño de la mezcla fue de 3", sin embargo, 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".

En la figura 4.1 se observan los resultados de resistencias a compresión del concreto con y sin la adición de fibras, a los 14 días de curado. Para el concreto sin la adición de fibras, la resistencia fue superior a las muestras elaboradas con adiciones. De acuerdo a un análisis estadístico del conjunto de muestras para cada adición y tipo de fibras, las de mejor comportamiento por presentar menores desviaciones a compresión fueron las fibras de polipropileno; como siguiente opción, las tiras de caucho fueron las que tuvieron mejor comportamiento en cuanto a la resistencia a compresión.

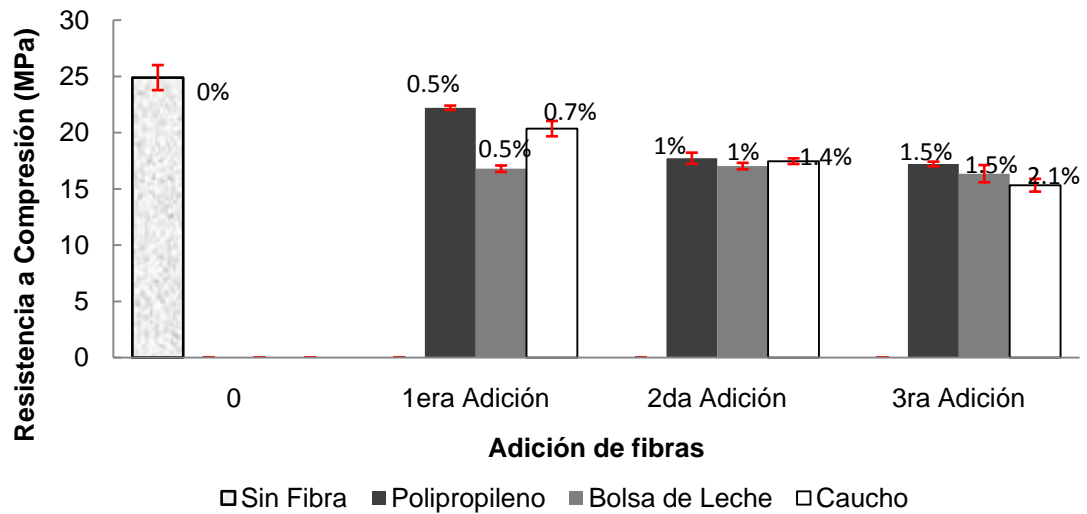


Figura 4.1. Resistencia a compresión para cada porcentaje de fibra, a 14 días de edad.

En cuanto a las resistencias a flexión de los ensayos realizados, se observa en la figura 4.2 una mejora en dicha propiedad para las muestras con adiciones de fibras con respecto a la muestra sin adición. 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.

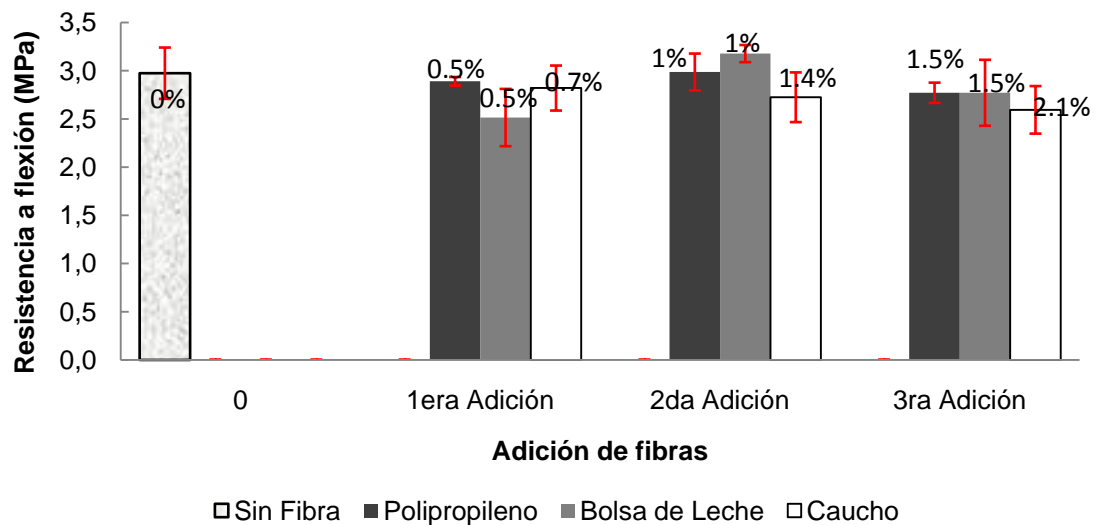


Figura 4.2. Resistencia a flexión para cada porcentaje de fibra, a 14 días de edad.

Teniendo en cuenta las desviaciones para cada adición y tipo de fibra, mostradas en la tabla 4.2, 4.3 y 4.4, se puede inferir que el porcentaje óptimo para las fibras de polipropileno y tiras de bolsa de leche es de 1% y para las tiras de caucho es de 0.7%, 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.

Tabla 4.2. Desviaciones Estándar para ensayos de compresión a 14 días.

| Porcentaje (%) | Desviación de la Resistencia a Compresión (MPa) | | | |
|----------------|---|---------------|--------|----------------|
| | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de Leche |
| 0 | 1.12 | | | |
| 1era Adición | | 0.19 | 0.68 | 0.28 |
| 2da Adición | | 0.49 | 0.25 | 0.29 |
| 3ra Adición | | 0.21 | 0.57 | 0.77 |

Tabla 4.3. Desviaciones Estándar para ensayos a flexión a 14 días.

| Porcentaje (%) | Desviación de la Resistencia a Flexión (MPa) | | | |
|----------------|--|---------------|--------|----------------|
| | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de Leche |
| 0 | 0.27 | | | |
| 1era Adición | | 0.04 | 0.23 | 0.30 |
| 2da Adición | | 0.19 | 0.26 | 0.09 |
| 3ra Adición | | 0.11 | 0.25 | 0.34 |

Tabla 4.4. Desviaciones Estándar para ensayos de módulo de elasticidad a 14 días.

| Porcentaje (%) | Desviación de Módulo de elasticidad (MPa) | | | |
|----------------|---|---------------|---------|----------------|
| | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de Leche |
| 0 | 200.86 | | | |
| 1era Adición | | 835.05 | 566.39 | 183.09 |
| 2da Adición | | 814.78 | 2591.95 | 299.19 |
| 3ra Adición | | 374.86 | 160.95 | 214.45 |

Los módulos de elasticidad, al igual que la resistencia a compresión se redujeron en las muestras con adiciones de fibras, caso contrario para 1.5% de bolsas de leche, el cual fue superior que la muestra testigo. Dentro de las fibras con las cuales se obtuvieron mejores resultados de módulo fueron las bolsas de leche.

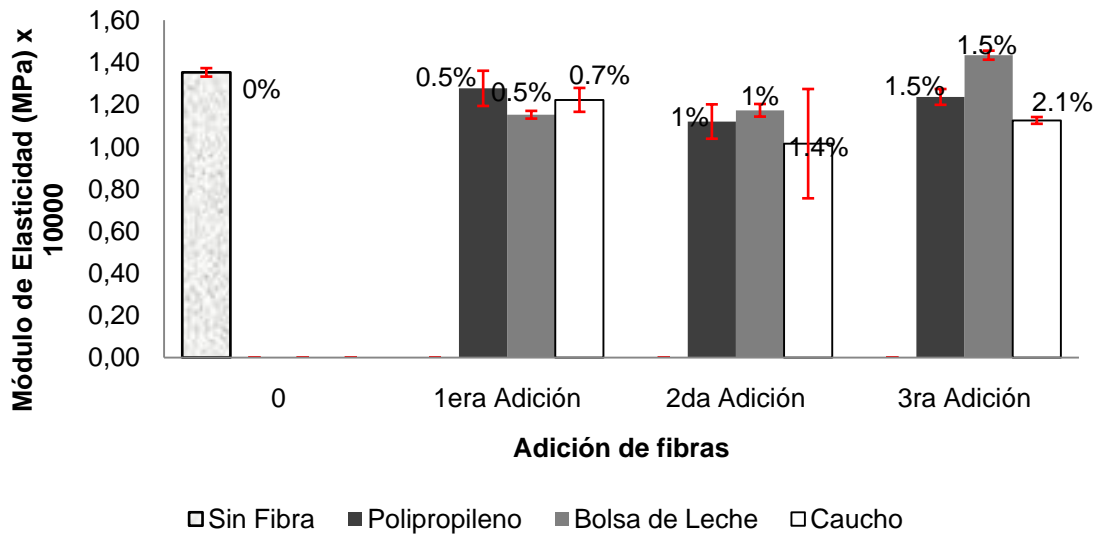


Figura 4.3. Módulo de Elasticidad para cada porcentaje de fibra, a 14 días de edad.

Con los porcentajes óptimos de cada fibra se hicieron dos ensayos de resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad a los 28 días. Los resultados demuestran que a una edad avanzada las resistencias aumentan en el concreto con fibras, tal como se observa en la figura 4.4, donde las fibras de polipropileno mostraron mejores resultados, con respecto a las adiciones de caucho y bolsa de leche y las que menores desviaciones tuvieron con respecto a las demás muestras realizadas.

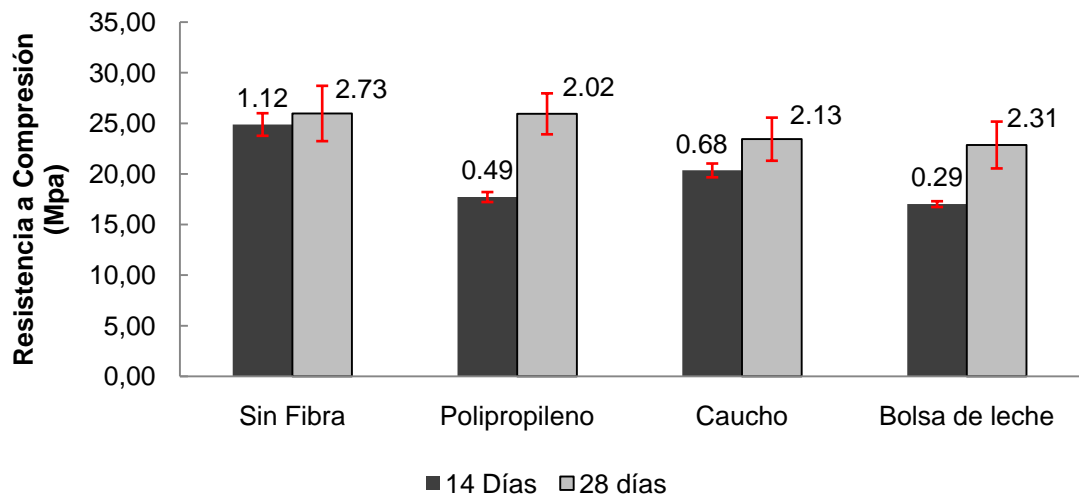


Figura 4.4. Ensayo de resistencia a compresión para porcentajes óptimos de fibras.

De la misma manera, se observaron mejoras en el comportamiento a flexión del concreto con fibras a la edad de 28 días (ver figura 4.5), donde las fibras de polipropileno mostraron mejores resultados con respecto a las fibras de bolsa de leche, las cuales presentaron a los 14 días un mejor comportamiento con respecto a las otras adiciones. Al igual que la figura anterior, para la resistencia a flexión se observan menores desviaciones para las fibras de polipropileno y una gran ganancia de resistencia a los 28 días de edad.

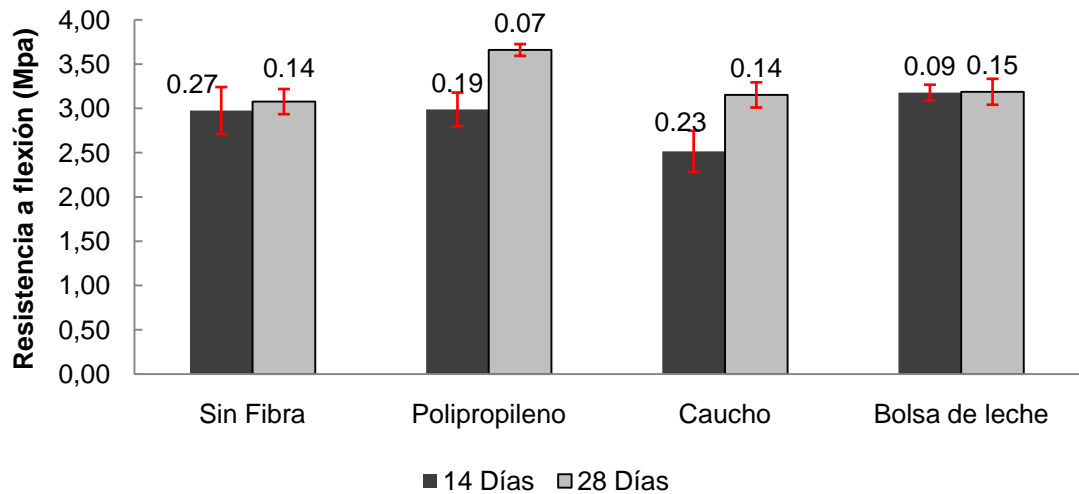


Figura 4.5. Ensayo de resistencia a flexión para porcentajes óptimos de fibras.

En cuanto a los módulos de elasticidad a los 28 días para los porcentajes óptimos de fibras se observó un leve incremento en las probetas sin fibras y con la adición de polipropileno, mientras que para el caucho y la bolsa de leche los resultados disminuyeron con la edad, lo cual se contradice con los resultados de resistencia a compresión y cuyas causas pueden deberse a muchas variables, algunas de ellas tales como: 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 de probetas para los ensayos también constituye un factor importante en los bajos valores de módulo, lo cual se observa en la figura 4.6 al presentar una mayor dispersión y variabilidad de los resultados con respecto al valor medio de cada tipo de fibra, obteniéndose una mayor incertidumbre y menor precisión.

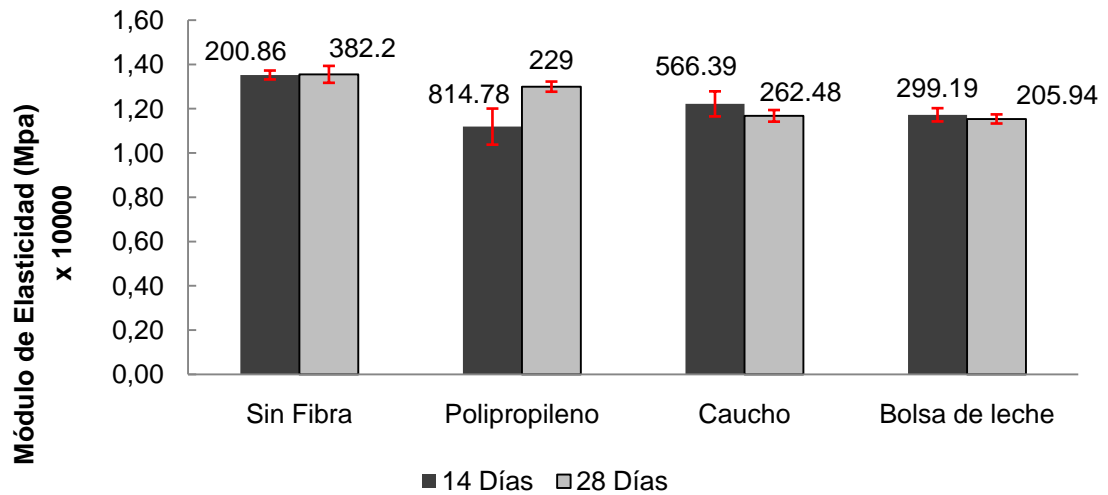


Figura 4.6. Ensayo de Módulo de Elasticidad para porcentajes óptimos de fibras.

4.2 Ensayos Dinámicos

Con los resultados de los ensayos estáticos, se seleccionó el porcentaje óptimo para cada fibra y se elaboraron las probetas correspondientes a los ensayos dinámicos, 4 de ellas de forma cilíndrica para los ensayos de módulos dinámicos y 4 de forma prismática, para los ensayos de fatiga. Las normas utilizadas para estos ensayos son AFNOR NF P18-400 y AFNOR NF P98-233-1, correspondiente a los ensayos de módulo y fatiga, respectivamente, 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.

Para los ensayos de módulos dinámicos se realizaron a una frecuencia de 5 Hz, una carga y amplitud de 25 kN y 200 ciclos. Asimismo, se realizaron 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 4.5. En el caso particular para las fibras de polipropileno se tuvo que rechazar los valores de la probeta uno (1) debido a que presentaba inconsistencias con los demás resultados del mismo tipo de fibra.

Tabla 4.5. 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) | Módulo Dinámico Promedio (MPa) | Módulo Estático Promedio(MPa) | Módulo Estático Promedio(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 | | | |

En cuanto a los ensayos de fatiga, para cada porcentaje de adición, se aplicó un porcentaje de la carga máxima a flexión obtenida mediante los ensayos estáticos, a frecuencias de 3, 5 y 10 Hz. Los resultados para este tipo de ensayo no fueron los esperados, pues las probetas ensayadas sufrieron variaciones en cuanto a la resistencia a flexión, por lo cual al realizar el ensayo, las cargas aplicadas superaban lo que realmente soportaban las viguetas.

Debido a errores en los ensayos de fatiga para las muestras con porcentajes óptimos de fibras, se realizaron los modelos de fatiga de acuerdo a los modelos citados anteriormente, correspondientes al 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).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Ensayos Estáticos

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 entrapado, tendiendo a afectar levemente la trabajabilidad, 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. (Maccaferri América Latina, 2007). Sin embargo, dichos resultados contrastan con los de algunos autores, donde se señala que el asentamiento aumenta con la adición de fibras de polipropileno (Barreda, et al., 2000), mientras que para otros se reduce con el porcentaje de adición (Álvarez, 2009).

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 la adición de fibras en el concreto mantienen unidas las partículas permitiendo mayores deformaciones y una mayor capacidad de soportar carga aun cuando se presenten agrietamientos (Albano, et al., 2008). Mayormente, la presencia de fibras de polipropileno resulta ser eficaz para limitar los efectos de agrietamiento destructivo, es decir, minimizar el estallido del concreto, con lo cual cierta fracción volumétrica (1% a 25%) ayuda a mitigar significativamente este fenómeno (Maccaferri América Latina, 2007).

De los resultados de resistencia a la compresión, flexión y módulo de elasticidad, a 14 días de edad, se obtiene la tabla 5.1, donde se hace una comparación de los resultados en términos de porcentaje con la muestra testigo.

Tabla 5.1. 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

Estos resultados reflejan que a mayor adición de fibras la resistencia a compresión disminuye, lo cual se asemeja a lo que algunos autores concluyen (Albano, et al., 2008; Álvarez, 2009; Khaloo, et al., 2008). Para la resistencia a compresión de las diferentes muestras, se observó una disminución de hasta un 30.9% para 1.5% de adición de polipropileno, dicho efecto puede deberse al aumento de porosidad generada por la adición de fibras (Rincón, et al., 2004). En cuanto a las tiras de caucho, la disminución máxima fue del 38.4%, correspondiente al 2.1%, ya que su propiedad de impermeabilidad ocasiona que sea más difícil su adherencia al concreto, afectando notablemente los esfuerzos de compresión (Siddique & Naik, 2004), dichos esfuerzos también pueden afectarse por la forma de las partículas de caucho en que fueron adicionadas, generando vacíos y disminuyendo su densidad con respecto a la del concreto sin fibras (Hernandez-Olivares, et al., 2002; Siddique & Naik, 2004). Finalmente, para la adición de bolsas de leche, se aprecia una disminución del 34.3% para una adición del 1.5%, por ofrecer una mayor porosidad generado por la no adherencia en estado fresco de estas fibras al concreto, aunque su utilización puede ser aplicable cuando la finalidad no exija alta resistencia a compresión como en el caso de los pavimentos (Coró, 2002).

Por otra parte, la adición de fibras tuvo un aporte importante en la resistencia a flexión, lo cual se manifiesta en las fibras de polipropileno y bolsa de leche con un aumento de hasta 0.4% y 6.8%, respectivamente, correspondiente a los porcentajes de 1% de adición, siendo éstos los porcentajes óptimos de fibra. En las fibras de polipropileno, esto se produce porque las fibras tienen una propiedad de elongación bastante representativa, lo que hace que soporten grandes cargas a tensión y sus esfuerzos se incrementan (Barreda, et al., 2000; F. Medina & Cifuentes, 2007). Por otro lado, las fibras de polipropileno 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 (Álvarez, 2009). Este incremento en la resistencia a flexión no fue

proporcional a la dosificación de fibras empleadas, difiriendo un poco con algunos autores (Rincón, et al., 2004).

Para las fibras de bolsa de leche, el aumento en la flexión es producido por el entrapado dentro de la masa de concreto, haciéndolo más fuerte y aumentando la resistencia en más de una dirección, ya que la adición de las tiras forma una especie de tejido que refuerzan el compuesto en todas las direcciones (Hernández & Torres, 2002).

En cuanto a las tiras de caucho, ocurrió una disminución de hasta un 12.8% para el 2.1% de adición, por lo que se seleccionó un porcentaje óptimo de fibra de 0.7% por ser el que mejor se comportaba a flexión. Hay que tener en cuenta que el caucho en sus propiedades físicas es muy elástico lo que proporciona una mayor resistencia a la flexión, pero este al mismo tiempo en sus características de textura es liso lo que impide una buena adherencia con el concreto, por ello es que su resistencia a flexión no fue la más óptima (Siddique & Naik, 2004), dichos resultados concuerdan con los obtenidos en otras investigaciones (Álvarez, 2009; Hernández & Torres, 2002; JR Roesler, Altoubat, Lange, Rieder, & Ulreich, 2006).

Adicionalmente, se observa que el aditivo acelerante utilizado en el diseño de mezcla no trabajó debidamente, ya que las resistencias a compresión a temprana edad con respecto a las resistencias a los 28 días fueron inferiores en porcentajes de hasta 32% para el concreto con la adición de fibras de polipropileno, un 26% para las adiciones de bolsas de leche, 13% para las bolsas de leche y un 4% para la muestra testigo. En cuanto a la disminución de la resistencia a flexión, se obtuvieron valores inferiores en 18% con respecto a la resistencia a los 28 días para las fibras de polipropileno, 11% para caucho y 3% para la muestra testigo.

La presencia de 7.58% de arcilla en el agregado fino y un 53% de resistencia al desgaste en el agregado grueso incidió directamente en la resistencia a la compresión del concreto, ya que los valores aceptados en las especificaciones son de 3% para el contenido de finos en arenas y 40% para la resistencia al desgaste con la máquina de los ángeles en las gravas (IDU-ET-2005, 2006).

De igual forma, se observó una disminución en cuanto a los módulos de elasticidad para las adiciones de fibras, siendo la máxima de 17.2% para 1% de polipropileno, 25% para 1.4% de caucho y 14.9% para 0.5% de bolsa de leche, lo que significa que la adición de fibras proporcionan mayores deformaciones y aportan mayor capacidad de absorción de choques o impactos (Álvarez, 2009; Resistencia a Flexión del concreto, "). En esta última fibra, se encontró un aumento para el 1.5% del 6% con respecto al concreto sin fibras, lo que indica que el concreto con mayor dosificación de bolsa de leche demostró un efecto contrario al esperado, tal como lo señalan algunos autores (Balaguru & Khajuria, 1996; Khaloo, et al., 2008). Para el concreto con adición de caucho esta disminución se presenta debido al mayor número de vacíos generada por la distribución de las partículas (Albano, et al., 2008; Khaloo, et al., 2008), sin embargo, los resultados

encontrados, con respecto a las fibras de caucho, aumentan con la cantidad de fibras, efecto contrario encontrado en otros estudios (Anguas, et al., 2002; Khaloo, et al., 2008).

De manera semejante, para los porcentajes óptimos de fibras a la edad de 28 días se realizó un análisis comparativo en términos de porcentajes entre las diferentes edades y con respecto a la muestra testigo.

En la figura 5.1, se observa que la resistencia a compresión en la muestra testigo no varía significativamente con la edad de curado, ligeramente alcanza a incrementarse en un 4.38%, sin embargo, se logra un considerable aumento para el concreto con adición de fibras, especialmente, para el concreto con fibras de polipropileno, el cual llegó a aumentar en un 46.39% llegando a tener casi la misma resistencia que la de un concreto tradicional, mientras que para tiras de caucho y bolsa de leche, el aumento fue de un 15.16% y 34.31% respectivamente.

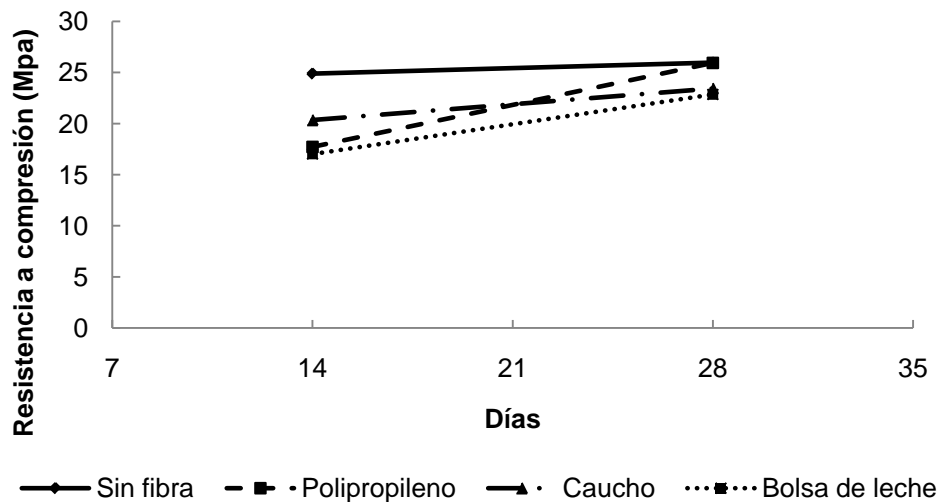


Figura 5.1. Comparación de la resistencia a compresión en los diferentes porcentajes óptimos de fibras para diferentes edades.

En cuanto a la resistencia a flexión, también se observó un crecimiento de las resistencias con la edad de las probetas (ver figura 5.2), dicho aumento no fue tan importante para algunas muestras como las de un concreto sin fibras y las de bolsa de leche, los cuales tuvieron un incremento de 3.44% y 0.30%, respectivamente, en cambio, para las muestras con adición de polipropileno y caucho se observó un importante aumento, el cual no pudo observarse en los ensayos realizados a los 14 días. Para las fibras de polipropileno, la resistencia fue superior a los otros tipos de fibras, mejorando en un 22.51% con respecto a los ensayos a temprana edad. En último lugar, las probetas con adiciones de tiras de caucho alcanzaron una resistencia superior con respecto a la inicial en 11.75%.

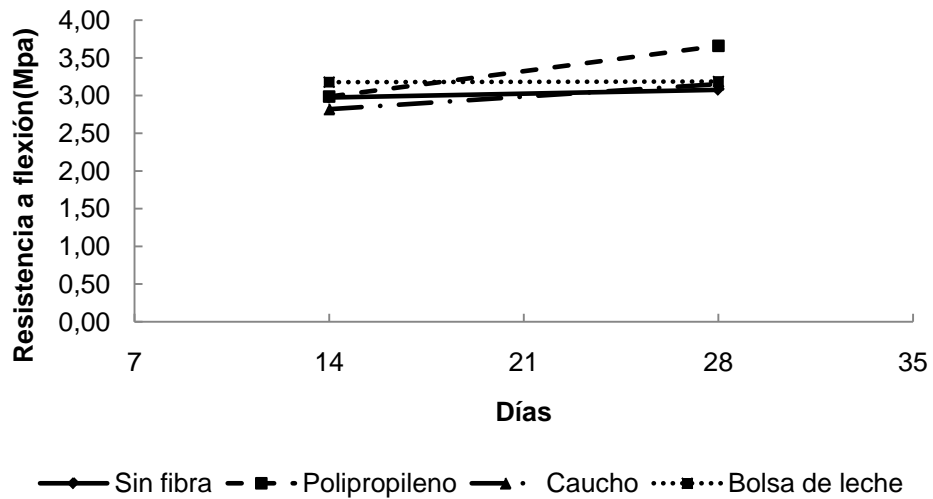


Figura 5.2. Comparación de la resistencia a flexión en los diferentes porcentajes óptimos de fibras para diferentes edades.

En el mismo orden de ideas, los módulos de elasticidad para los porcentajes óptimos tuvieron en algunos casos un incremento mientras que en otros un mínimo decremento (bolsa de leche y caucho) debido a la porosidad de la mezcla (Anguas, et al., 2002). Para la fibra de polipropileno este incremento fue de 16.13%, en tanto, para las tiras de caucho hubo una disminución de 4.43% y de 1.60% para las fibras de bolsa de leche, lo cual sigue siendo menor que la muestra patrón, pues 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; Hernandez-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).

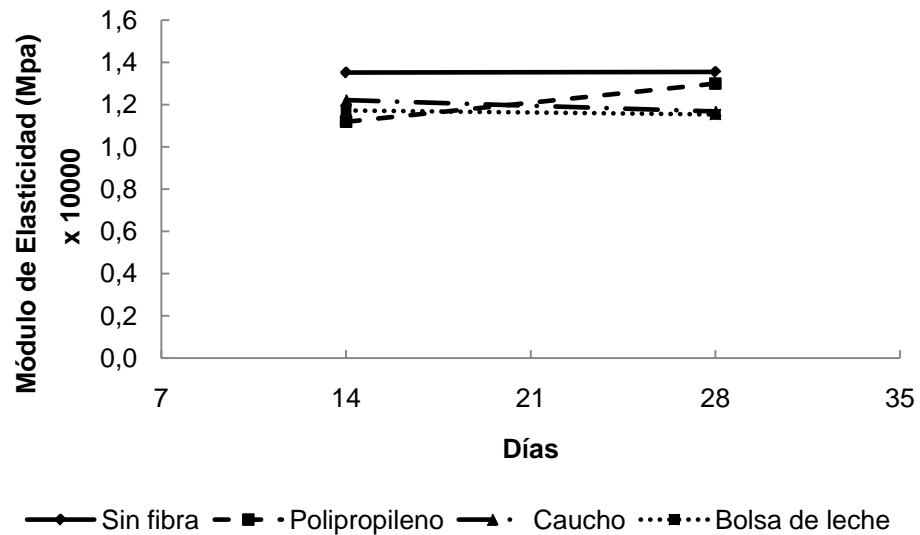


Figura 5.3. Comparación de módulo de elasticidad en los diferentes porcentajes óptimos de fibras para diferentes edades.

En la tabla 5.2, se presenta el aumento de las resistencias con respecto a las de un concreto sin adición de fibras, donde claramente se observa que para las fibras de polipropileno, la disminución fue muy poca de 0.14%, mientras que para las tiras de caucho la reducción fue de 9.78% y 11.99% para las tiras de bolsas de leche.

No obstante, tal como se mencionó anteriormente, la resistencia a la flexión se ve afectada de manera positiva para el concreto con adición de fibras, especialmente para las fibras de polipropileno, las cuales alcanzaron a incrementarse en un 18.95% con respecto a la muestra testigo. Los valores correspondientes a las tiras de caucho y bolsas de leche se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Resistencias con respecto al concreto sin fibras, a 28 días de edad.

| Fibra | % Óptimo | Compresión | Flexión | Módulo de elasticidad |
|----------------|----------|------------|----------|-----------------------|
| Polipropileno | 1 | ↓ 0.14% | ↑ 18.95% | ↓ 4.09% |
| Caucho | 0.7 | ↓ 9.78% | ↑ 2.44% | ↓ 13.83% |
| Bolsa de leche | 1 | ↓ 11.99% | ↑ 3.60% | ↓ 14.86% |

↓: disminución ↑: aumento

De los resultados de módulo de elasticidad a la edad de 14 días, se realizó un análisis en el cual se compara la gráfica de esfuerzo vs deformación de un concreto sin fibras con cada tipo y adición de fibras. La figura 5.4 muestra que con la adición de polipropileno, el concreto se hace menos rígido que uno sin fibras, lo cual permite absorber mayores deformaciones antes de llegar a la falla, siendo

muy ventajoso para los pavimentos ya que puede aumentar su vida útil y su nivel de servicio (Álvarez, 2009; Zagaceta & Romero, 2008).

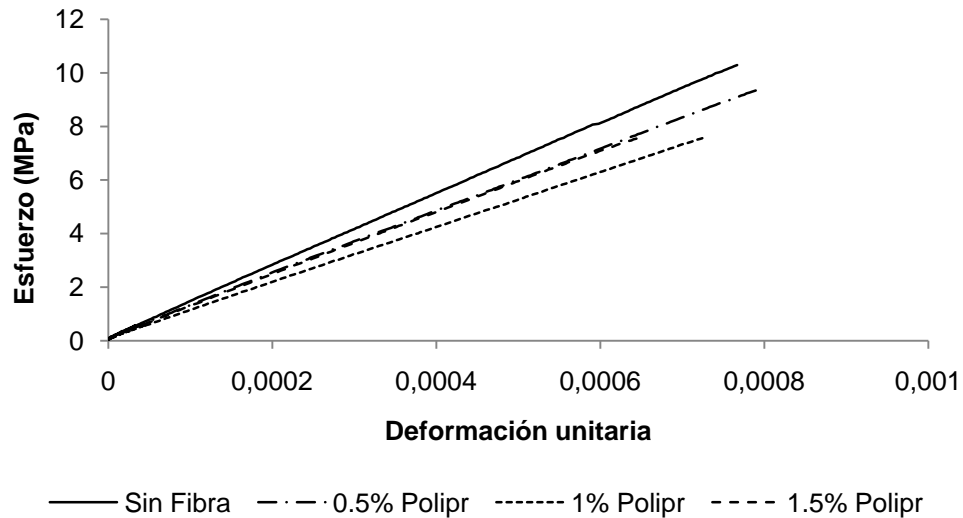


Figura 5.4. Relación del Módulo de Elasticidad: Sin fibra y Polipropileno.

Asimismo, para la adición de caucho, en la figura 5.5 se observan mayores deformaciones unitarias en un concreto con 0.7% de adición de fibras, generando una menor rigidez con poca disminución del esfuerzo aplicado.

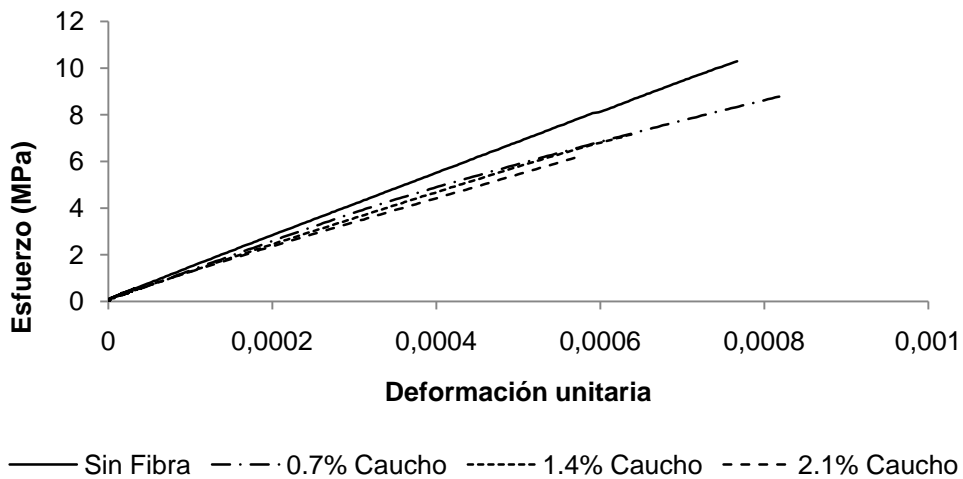


Figura 5.5. Relación del Módulo de Elasticidad: Sin fibra y Caucho.

Del mismo modo, para el 1% de bolsas de leche se observan mayores deformaciones que los otros porcentajes de fibras, proporcionando al concreto una menor rigidez que la muestra sin adición, la cual presenta un comportamiento más frágil (Ver figura 5.6).

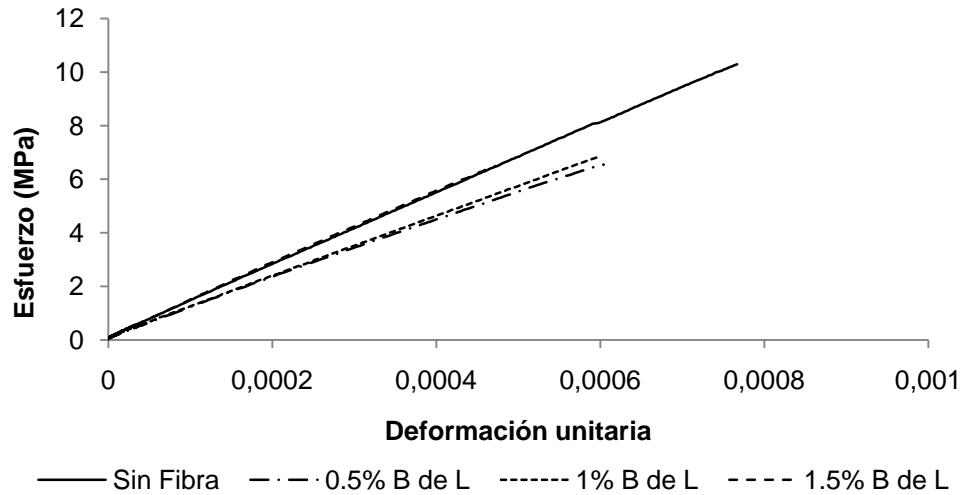


Figura 5.6. Relación del Módulo de Elasticidad: Sin fibra y Bolsa de Leche.

Para los porcentajes óptimos a los 28 días, se muestra una clara tendencia del concreto con fibras a ser menos rígido que un concreto sin fibras (ver figura 5.7), esto quiere decir que menor será la probabilidad de que ocurra el agrietamiento del concreto por la adición de fibras (Coró, 2002).

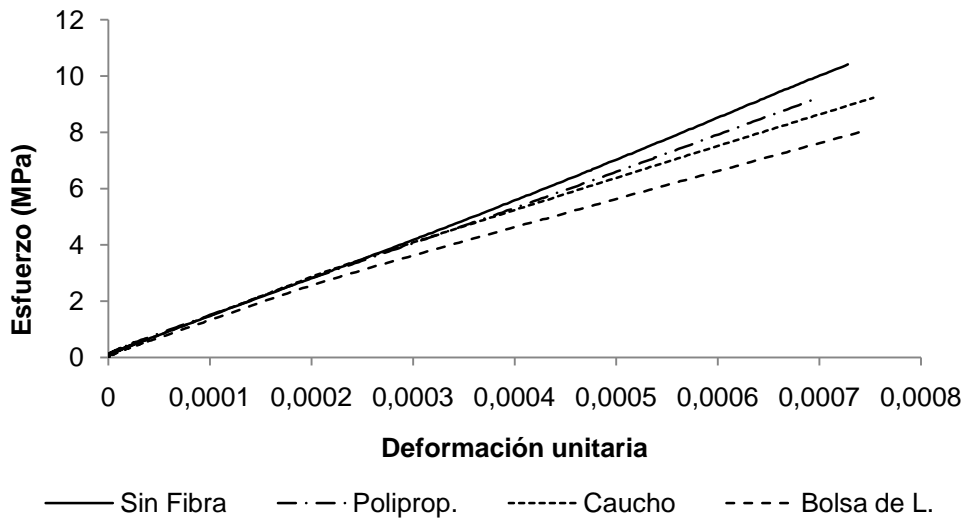


Figura 5.7. Relación del Módulo de Elasticidad a 28 días de edad.

5.2 Ensayos Dinámicos

De los ensayos de módulos dinámicos, se observó que los resultados 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 (Hernandez-Olivares, et al., 2002). Adicionalmente, los bajos módulos dinámicos pueden deberse a las propiedades de los agregados, de manera que aunque la relación agua/cemento es el factor más importante en la resistencia del concreto, las propiedades de los agregados tales como forma, textura y tamaño del agregado no pueden ser ignoradas (Anguas, et al., 2002).

Se observó también que el incremento de los módulos de elasticidad es aproximadamente en promedio de 6.5% con respecto a los módulos estáticos para los módulos dinámicos, dichos resultados aumentan en promedio alrededor de 685 MPa, lo cual coincide con algunas investigaciones (Anguas, et al., 2002).

La variación en los resultados de los ensayos de fatiga pudo deberse a la mala vibración en la elaboración de las viguetas o bien, a la manipulación, transporte desde el lugar de trabajo y curado hacia el laboratorio, falta del manejo apropiado y curado de los cilindros antes de llegar al laboratorio, técnicas inadecuadas de pruebas de laboratorio y vibraciones accidentales de las muestras fraguadas pero todavía no curadas (Lavon & Fradua, 1998; Resistencia a Flexión del concreto,"), ya que las condiciones del diseño de mezcla y curado fueron las mismas que las primeras muestras realizadas para ensayos estáticos, sin embargo, a veces la culpa reside en un muestreo y unos procedimientos de prueba deficientes, por lo cual los resultados, especialmente, los de las probetas con adiciones de caucho donde se observó gran variabilidad, arrojaron diferencias significativas en las resistencias (Lavon & Fradua, 1998).

Adicionalmente, pocas muestras para los ensayos no proporcionan datos suficientes para un análisis estadístico, requiriéndose como mínimo 10 probetas, a fin de establecer valores confiables. Es por esto que los valores o el promedio de los mismos están fuera del rango de confiabilidad esperada, es decir, hay cierta probabilidad de que el promedio de los valores de resistencia caigan por debajo de la resistencia de diseño (Instituto Mexicano Del Cemento y Del Concreto, 1988).

5.3 Leyes de Fatiga

Debido a los problemas encontrados en los ensayos de fatiga, se realizó un análisis empírico de acuerdo a los modelos desarrollados por otros autores, tales como el modelo de cero mantenimiento, modelo calibrado mecanicista y modelo PCA, por ser los que menor cantidad de daños por agrietamiento predicen (J Roesler & Rao, 2005), para ello se generaron ajustes lineales a los modelos anteriormente descritos con el fin de obtener las pendientes de fatiga para cada tipo de fibras y la muestra testigo (ver figuras 5.8, 5.9 y 5.10).

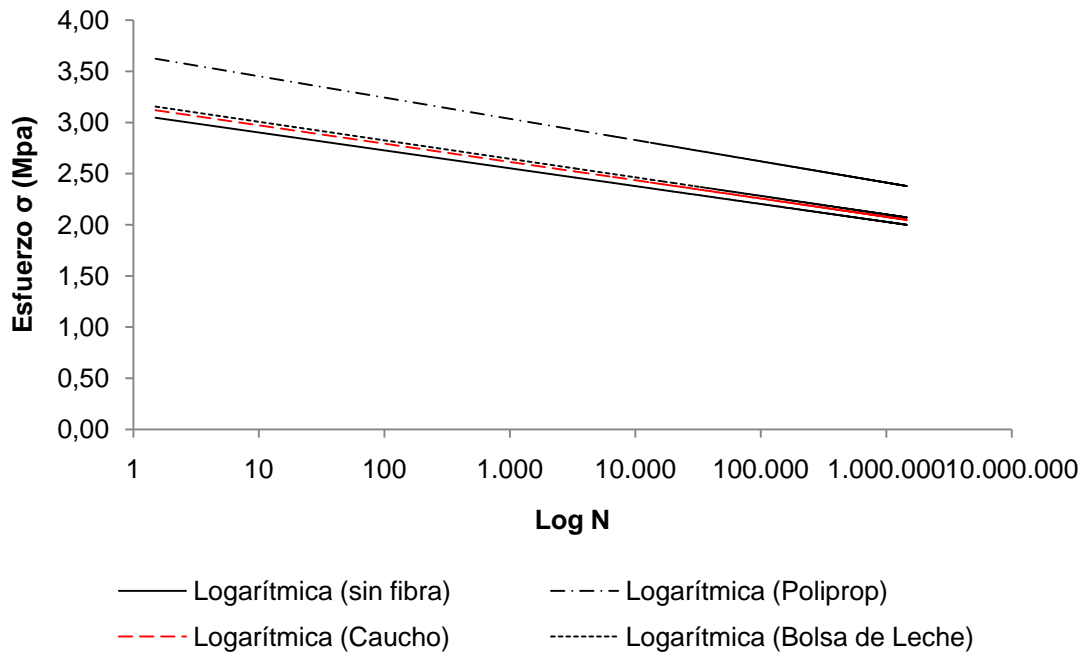


Figura 5.8. Leyes de Fatiga (Modelo Cero Mantenimiento).

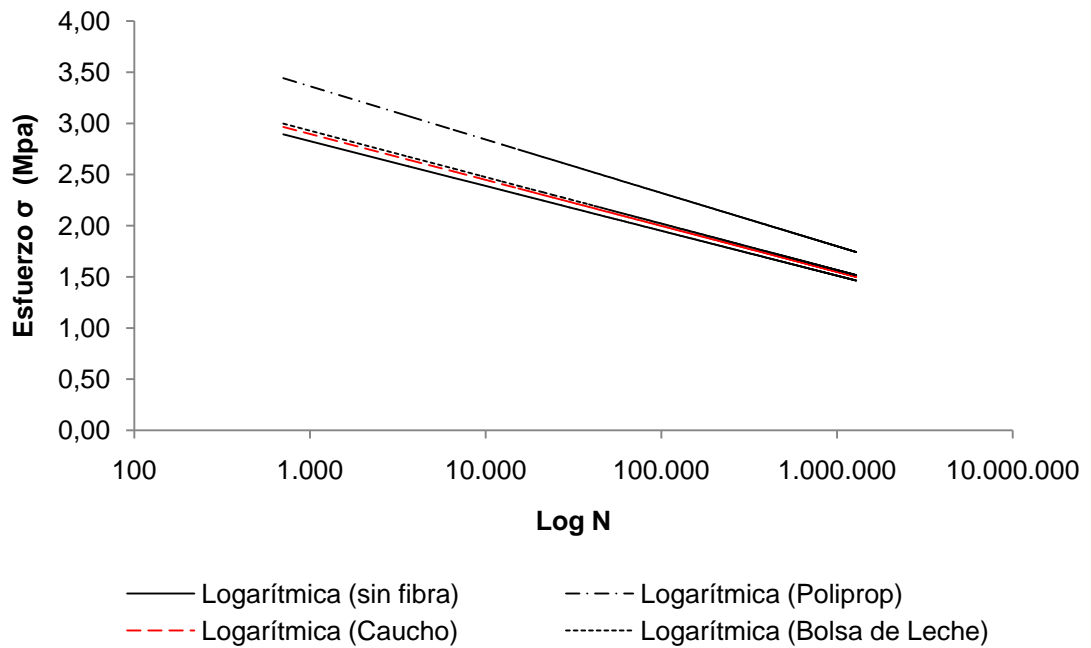


Figura 5.9. Leyes de Fatiga (Modelo Calibrado Mecanicista).

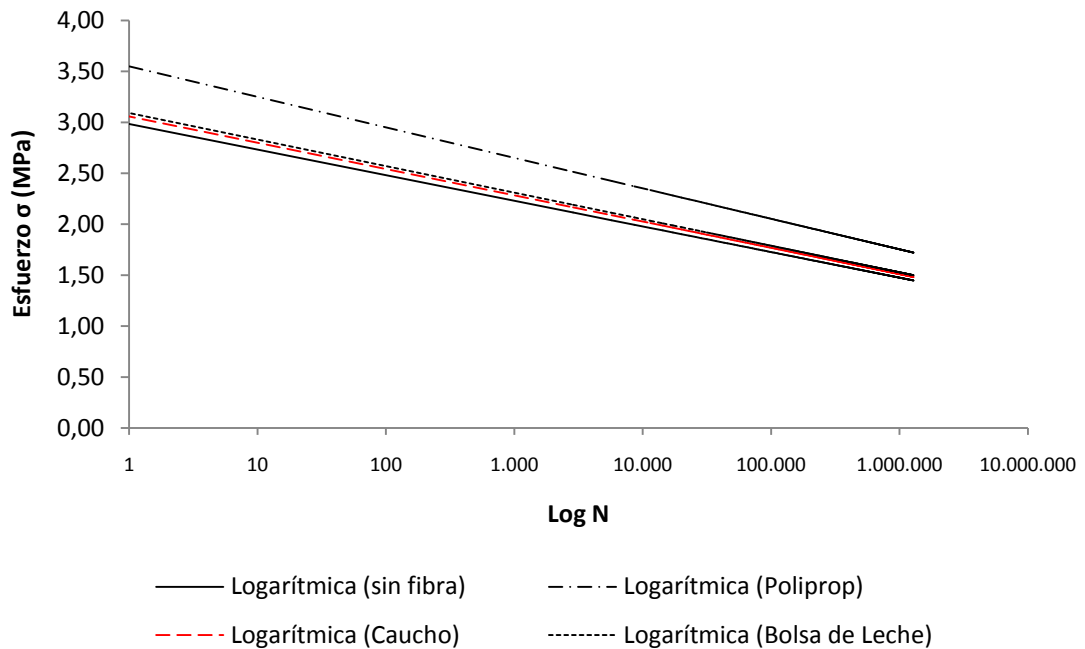


Figura 5.10. Leyes de Fatiga (Modelo PCA).

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

En la tabla 5.3 se muestran las pendientes de fatiga para cada modelo y los esfuerzos de tracción para un millón de repeticiones (σ_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 5.3. Características de los diferentes concretos en fatiga.

| Muestra | Modelo Cero Mantenimiento | | | Calibrado Mecanicista | | | PCA | | |
|----------------|------------------------------|------------|-------|--------------------------|------------|-------|--------|------------|-------|
| | b | σ_6 | S_N | b | σ_6 | S_N | b | σ_6 | S_N |
| Sin Fibra | -0.076 | 2.029 | | -0.190 | 1.600 | | -0.109 | 1.477 | |
| Polipropileno | -0.090 | 2.413 | 1 | -0.226 | 1.940 | 0.97 | -0.130 | 1.757 | 0.99 |
| Caucho | -0.078 | 2.078 | | -0.195 | 1.670 | | -0.112 | 1.513 | |
| Bolsa de Leche | -0.079 | 2.102 | | -0.197 | 1.690 | | -0.113 | 1.530 | |

6. APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE UN PAVIMENTO

6.1 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, considerando un radio de carga de 0.125 m, una presión de contacto de 0.662 MPa y una distancia entre ejes de llantas de 0.375m. Adicionalmente se empleó sobre el concreto reforzado, en condición no ligada, un concreto pobre y sobre éste una subrasante con módulos de elasticidad de 20, 50 y 120 MPa, correspondiente a un suelo malo, regular y bueno, respectivamente. El tráfico utilizado para el diseño fue de 1 millón (T_2) y 5 millones (T_4) de ejes de 13 ton.

Para ello se consideró losas de concreto armada en continuo – BAC y un módulo de elasticidad de 20000 MPa para el concreto pobre. En cuanto al cálculo de las deformaciones mediante el programa CEDEM, se empezaron con capas de 14 cm de concreto pobre, teniendo en cuenta que el espesor mínimo tecnológico para esta capa es de 14 cm y para la capa de concreto armado en continuo de 10 cm, luego se realizaron las diversas modificaciones para buscar el diseño óptimo que satisficiera las admisibilidades calculadas en el punto anterior. El diseño final se muestra en las tablas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6, teniendo en cuenta el tipo de suelos y el número de ejes equivalentes.

Tabla 6.1. Cálculo de espesores, esfuerzos y admisibilidades para NE= 1 millón y suelo malo.

| Resultados del CEDEM | | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|----------------|
| Modelo Cero Mantenimiento | Espesores (cm) | BAC | 16 | 16 | 15 | 16 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.6315 | -1.5296 | -1.5805 | -1.499 |
| | | σ_{bc} | -1.4276 | -1.499 | -1.4684 | -1.5194 |
| | | ϵ_z | 525.00E-06 | 547.00E-06 | 537.00E-06 | 553.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 114.55 | 116.82 | 115.81 | 117.53 | |
| Modelo Mecanicista | Espesores (cm) | BAC | 28 | 25 | 27 | 26 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.9871 | -1.0911 | -1.0136 | -1.0299 |
| | | σ_{bc} | -0.5404 | -0.7342 | -0.6098 | -0.6975 |
| | | ϵ_z | 244.00E-06 | 311.00E-06 | 268.00E-06 | 299.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 78 | 88.08 | 81.79 | 86.3 | |
| Modelo PCA | Espesores (cm) | BAC | 26 | 22 | 25 | 24 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.0809 | -1.2338 | -1.1115 | -1.1217 |
| | | σ_{bc} | -0.6292 | -0.9279 | -0.7097 | -0.8117 |
| | | ϵ_z | 275.00E-06 | 375.00E-06 | 303.00E-06 | 337.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 82.83 | 96.68 | 86.89 | 91.67 | |

Tabla 6.2. Cálculo de espesores, esfuerzos y admisibilidades para NE= 1 millón y suelo regular.

| Resultados del CEDEM | | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
|------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|----------------|
| Modelo Cero Mantenimiento | Espesores (cm) | BAC | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.4582 | -1.3358 | -1.3868 | -1.295 |
| | | σ_{bc} | -1.8049 | -1.8457 | -1.8253 | -1.8559 |
| | | ϵ_z | 517.00E-06 | 525.00E-06 | 522.00E-06 | 528.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 71.55 | 72.11 | 71.87 | 72.28 | |
| Modelo Mecanicista | Espesores (cm) | BAC | 24 | 20 | 23 | 22 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.0136 | -1.1319 | -1.0299 | -1.0401 |
| | | σ_{bc} | -0.6241 | -0.9116 | -0.7016 | -0.7984 |
| | | ϵ_z | 226.00E-06 | 305.00E-06 | 248.00E-06 | 275.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 47.42 | 55.1 | 49.67 | 52.28 | |
| Modelo PCA | Espesores (cm) | BAC | 22 | 18 | 21 | 20 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.1013 | -1.2134 | -1.1217 | -1.1217 |
| | | σ_{bc} | -0.7301 | -1.0605 | -0.8198 | -0.93 |
| | | ϵ_z | 256.00E-06 | 345.00E-06 | 281.00E-06 | 310.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 50.45 | 58.55 | 52.82 | 55.52 | |

Tabla 6.3. Cálculo de espesores, esfuerzos y admisibilidades para NE= 1 millón y suelo bueno.

| Resultados del CEDEM | | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
|------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|----------------|
| Modelo Cero Mantenimiento | Espesores (cm) | BAC | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.2134 | -1.1013 | -1.1523 | -1.0707 |
| | | σ_{bc} | -1.4072 | -1.4378 | -1.4276 | -1.448 |
| | | ϵ_Z | 356.00E-06 | 361.00E-06 | 359.00E-06 | 363.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 38.33 | 38.61 | 38.49 | 38.7 | |
| Modelo Mecanicista | Espesores (cm) | BAC | 20 | 10 | 18 | 16 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.9932 | -1.1013 | -1.0299 | -1.0503 |
| | | σ_{bc} | -0.6954 | -1.4378 | -0.8351 | -1.0024 |
| | | ϵ_Z | 207.00E-06 | 361.00E-06 | 239.00E-06 | 276.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 29.35 | 38.61 | 31.52 | 33.82 | |
| Modelo PCA | Espesores (cm) | BAC | 17 | 10 | 15 | 10 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.1013 | -1.1013 | -1.1319 | -1.0707 |
| | | σ_{bc} | -0.8749 | -1.4378 | -1.0401 | -1.448 |
| | | ϵ_Z | 248.00E-06 | 361.00E-06 | 284.00E-06 | 363.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 32.08 | 38.61 | 34.29 | 38.7 | |

Tabla 6.4. Cálculo de espesores, esfuerzos y admisibilidades para NE= 5 millones y suelo malo.

| Resultados del CEDEM | | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
|---------------------------|---------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|----------------|
| Modelo Cero Mantenimiento | Espesores (cm) | BAC | 21 | 22 | 21 | 22 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.3460 | -1.2338 | -1.3154 | -1.2236 |
| | | σ_{bc} | -.9381 | -.9279 | -.9748 | -.9483 |
| | | ϵ_z | 378.00E-06 | 375.00E-06 | 389.00E-06 | 381.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 97.15 | 96.68 | 98.61 | 97.52 | |
| Modelo Mecanicista | Espesores (cm) | BAC | 38 | 37 | 37 | 37 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.6445 | -0.6546 | -0.6628 | -0.6495 |
| | | σ_{bc} | -.2763 | -.3222 | -.3090 | -.3314 |
| | | ϵ_z | 144.00E-06 | 162.00E-06 | 157.00E-06 | 166.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 59.82 | 63.51 | 62.50 | 64.23 | |
| Modelo PCA | Espesores (cm) | BAC | 32 | 30 | 32 | 31 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.8270 | -0.8759 | -0.8147 | -0.8321 |
| | | σ_{bc} | -.4069 | -.5099 | -.4273 | -.4884 |
| | | ϵ_z | 195.00E-06 | 233.00E-06 | 203.00E-06 | 225.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 69.66 | 76.13 | 70.99 | 74.86 | |

Tabla 6.5. Cálculo de espesores, esfuerzos y admisibilidades para NE= 5 millones y suelo regular.

| Resultados del CEDEM | | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
|------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|----------------|
| Modelo Cero Mantenimiento | Espesores (cm) | BAC | 17 | 10 | 16 | 17 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.3358 | -1.1013 | -1.3256 | -1.2236 |
| | | σ_{bc} | -1.0911 | -1.4378 | -1.2134 | -1.1727 |
| | | ϵ_z | 351.00E-06 | 361.00E-06 | 382.00E-06 | 371.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 38.33 | 38.61 | 38.49 | 38.7 | |
| Modelo Mecanicista | Espesores (cm) | BAC | 35 | 30 | 34 | 33 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.6363 | -0.6445 | -0.6526 | -0.6638 |
| | | σ_{bc} | -0.2896 | -0.3661 | -0.3243 | -0.3691 |
| | | ϵ_z | 124.00E-06 | 126.00E-06 | 135.00E-06 | 150.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 21.54 | 22.84 | 22.51 | 23.67 | |
| Modelo PCA | Espesores (cm) | BAC | 29 | 22 | 28 | 27 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.8168 | -0.878 | -0.8372 | -0.8484 |
| | | σ_{bc} | -0.4324 | -0.6373 | -0.4854 | -0.5537 |
| | | ϵ_z | 169.00E-06 | 194.00E-06 | 185.00E-06 | 206.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 25.34 | 28.39 | 26.49 | 27.83 | |

Tabla 6.6. Cálculo de espesores, esfuerzos y admisibilidades para NE= 5 millones y suelo bueno.

| Resultados del CEDEM | | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
|------------------------------|---------------------------------------|----------------|------------|---------------|------------|----------------|
| Modelo Cero Mantenimiento | Espesores (cm) | BAC | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -1.2134 | -1.0503 | -1.1523 | -1.0707 |
| | | σ_{bc} | -1.4072 | -1.4582 | -1.4276 | -1.448 |
| | | ϵ_Z | 356.00E-06 | 364.00E-06 | 359.00E-06 | 363.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 38.33 | 38.75 | 38.49 | 38.7 | |
| Modelo Mecanicista | Espesores (cm) | BAC | 31 | 29 | 30 | 29 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.6414 | -0.6567 | -0.6546 | -0.6618 |
| | | σ_{bc} | -0.3161 | -0.4079 | -0.3528 | -0.4007 |
| | | ϵ_Z | 112.00E-06 | 137.00E-06 | 122.00E-06 | 135.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 21.54 | 23.84 | 22.51 | 23.67 | |
| Modelo PCA | Espesores (cm) | BAC | 25 | 21 | 24 | 23 |
| | | BC | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Esfuerzos (Mpa) y deformaciones | σ_{bac} | -0.8188 | -0.8851 | -0.8321 | -0.8341 |
| | | σ_{bc} | -0.4782 | -0.7087 | -0.5353 | -0.6057 |
| | | ϵ_Z | 155.00E-06 | 211.00E-06 | 169.00E-06 | 186.00E-06 |
| Deflexión (mm/100) | | 25.34 | 29.60 | 26.49 | 27.83 | |

Para un millón de ejes equivalentes de 13 toneladas, se observa 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 observa 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.

En el modelo calibrado mecanicista se puede lograr una disminución de la base de concreto hasta 3 centímetros para las fibras de polipropileno, 2 cm con la adición de tiras de bolsas de leche y 1 cm para las tiras de caucho. De la misma manera ocurre para el modelo PCA con las fibras de polipropileno, mientras que para las otras fibras se puede obtener un 8% y 4% correspondiente a las fibras de bolsa de leche y caucho, respectivamente.

Para un suelo regular y bueno, en el modelo cero mantenimiento, al igual que el caso anterior, los espesores para un concreto sin fibras y otro con adiciones no presentan variación alguna, conllevando a costos relativamente mayores con el uso de fibras plásticas. No obstante, 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 (T_4) y un suelo malo se observa un efecto contrario de las fibras de polipropileno y bolsa de leche en el pavimento para el modelo cero mantenimiento, proporcionando espesores de 1 centímetro por encima que un concreto sin adiciones, esto para garantizar la admisibilidad en la subrasante, esto debido a la ecuación límite mecanicista utilizada para la deformación en la base del suelo, teniendo en cuenta que este resultado puede variar si se considera otro modelo de límite de deformación elástica del suelo.

En un suelo malo para este tráfico, los modelos mecanicistas y PCA, arrojan una reducción de espesores entre un 3% y 6% para las fibras de polipropileno y 3% para las otras adiciones. En un suelo regular, estos porcentajes se incrementan hasta un 7% para el polipropileno y 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.

Los cálculos de los aceros de refuerzo se muestran en las tablas 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12, 6.13 y 6.14, para cada tipo de fibra utilizada y tipo de tránsito.

Tabla 6.7. Dimensionamiento del acero para el concreto sin fibras (T_1).

| Modelo | Tipo de Suelo | Sin Fibras | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 37 | φ | 5/8" | c/ | 26 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 63 | φ | 5/8" | c/ | 15 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 54 | φ | 5/8" | c/ | 17 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 45 | φ | 5/8" | c/ | 21 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 58 | φ | 5/8" | c/ | 16 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 50 | φ | 5/8" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 39 | φ | 5/8" | c/ | 24 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.8. Dimensionamiento del acero para el concreto con fibras de polipropileno (T_1).

| Modelo | Tipo de Suelo | Polipropileno | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 37 | φ | 5/8" | c/ | 26 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 56 | φ | 5/8" | c/ | 17 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 45 | φ | 5/8" | c/ | 21 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 50 | φ | 5/8" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 41 | φ | 5/8" | c/ | 23 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.9. Dimensionamiento del acero para el concreto con tiras de caucho (T₁).

| Modelo | Tipo de Suelo | Caucho | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 34 | φ | 5/8" | c/ | 28 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 61 | φ | 5/8" | c/ | 15 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 52 | φ | 5/8" | c/ | 18 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 41 | φ | 5/8" | c/ | 23 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 56 | φ | 5/8" | c/ | 17 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 47 | φ | 5/8" | c/ | 20 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 34 | φ | 5/8" | c/ | 28 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.10. Dimensionamiento del acero para el concreto con tiras de bolsa de leche (T₁).

| Modelo | Tipo de Suelo | Bolsa de leche | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 37 | φ | 5/8" | c/ | 26 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 58 | φ | 5/8" | c/ | 16 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 50 | φ | 5/8" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 37 | φ | 5/8" | c/ | 26 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 54 | φ | 5/8" | c/ | 17 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 45 | φ | 5/8" | c/ | 21 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.11. Dimensionamiento del acero para el concreto sin fibras (T₄).

| Modelo | Tipo de Suelo | Sin Fibras | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 47 | φ | 5/8" | c/ | 20 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 39 | φ | 5/8" | c/ | 24 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 59 | φ | 3/4" | c/ | 16 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 55 | φ | 3/4" | c/ | 17 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 49 | φ | 3/4" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 50 | φ | 3/4" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 46 | φ | 3/4" | c/ | 21 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 40 | φ | 3/4" | c/ | 24 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.12. Dimensionamiento del acero para el concreto con fibras de polipropileno (T_4).

| Modelo | Tipo de Suelo | Polipropileno | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 50 | φ | 5/8" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 37 | φ | 5/8" | c/ | 26 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 58 | φ | 3/4" | c/ | 16 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 53 | φ | 3/4" | c/ | 18 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 47 | φ | 3/4" | c/ | 20 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 47 | φ | 3/4" | c/ | 20 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 43 | φ | 3/4" | c/ | 22 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 35 | φ | 3/4" | c/ | 27 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.13. Dimensionamiento del acero para el concreto con tiras de caucho (T_4).

| Modelo | Tipo de Suelo | Caucho | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 47 | φ | 5/8" | c/ | 20 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 37 | φ | 5/8" | c/ | 26 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 58 | φ | 3/4" | c/ | 16 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 53 | φ | 3/4" | c/ | 18 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 47 | φ | 3/4" | c/ | 20 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 50 | φ | 3/4" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 44 | φ | 3/4" | c/ | 22 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 38 | φ | 3/4" | c/ | 25 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |

Tabla 6.14. Dimensionamiento del acero para el concreto con tiras de bolsa de leche (T_4).

| Modelo | Tipo de Suelo | Bolsa de leche | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|--------------------|---|------|----|----|------------------------|---|------|----|----|----|
| | | Acero Longitudinal | | | | | Acero de transferencia | | | | | |
| Cero Mantenimiento | Malo | 50 | φ | 5/8" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 39 | φ | 5/8" | c/ | 24 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 23 | φ | 5/8" | c/ | 42 | cm | φ | 3/8" | c/ | 70 | cm |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 58 | φ | 3/4" | c/ | 16 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 52 | φ | 3/4" | c/ | 18 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 46 | φ | 3/4" | c/ | 21 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| PCA | Malo | 49 | φ | 3/4" | c/ | 19 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Regular | 43 | φ | 3/4" | c/ | 22 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |
| | Bueno | 36 | φ | 3/4" | c/ | 26 | cm | φ | 1/2" | c/ | 70 | cm |

6.2 Presupuesto

Tal y como se observó en el apartado anterior, la disminución de espesores provoca una disminución de costos en la construcción de un pavimento, en la tabla 6.15 y 6.16 se muestra un resumen de los costos asociados de acuerdo con las variables estudiadas, para diferentes tráficos, donde se observa que los menores costos con respecto al costo de un concreto sin fibras, se dan 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.

Tabla 6.15. Costos en pesos colombianos (2010) de un pavimento para un tránsito T₁ y diferentes tipos de fibras, suelo y modelo.

| Modelo | Suelo | NE 1 millón | | | | % (Aumento) o reducción concreto sin adición de fibras | | |
|-----------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|---------|----------------|
| | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
| Cero Mantenimiento | Malo | \$ 3,201,776,444.24 | \$ 3,202,178,955.44 | \$ 3,061,152,505.47 | \$ 3,201,809,411.82 | (0.01%) | 4.39% | (0.00%) |
| | Regular | \$ 2,393,852,636.03 | \$ 2,394,104,205.53 | \$ 2,393,882,824.37 | \$ 2,393,873,240.77 | (0.01%) | (0.00%) | (0.00%) |
| | Bueno | \$ 2,393,852,636.03 | \$ 2,394,104,205.53 | \$ 2,393,882,824.37 | \$ 2,393,873,240.77 | (0.01%) | (0.00%) | (0.00%) |
| Calibrado Mecanicista | Malo | \$ 4,806,716,525.28 | \$ 4,403,459,015.78 | \$ 4,675,151,692.38 | \$ 4,534,454,534.91 | 8.39% | 2.74% | 5.66% |
| | Regular | \$ 4,271,108,279.76 | \$ 3,736,103,801.05 | \$ 4,139,531,371.53 | \$ 4,007,860,927.37 | 12.53% | 3.08% | 6.16% |
| | Bueno | \$ 4,189,902,360.97 | \$ 3,528,940,868.18 | \$ 4,031,620,117.19 | \$ 3,881,903,913.29 | 15.78% | 3.78% | 7.35% |
| PCA | Malo | \$ 4,534,400,962.59 | \$ 4,008,469,677.64 | \$ 4,402,830,092.03 | \$ 4,271,157,731.14 | 11.60% | 2.90% | 5.81% |
| | Regular | \$ 4,007,815,596.94 | \$ 3,464,101,228.50 | \$ 3,867,209,771.18 | \$ 3,735,541,243.73 | 13.57% | 3.51% | 6.79% |
| | Bueno | \$ 3,899,904,342.59 | \$ 3,301,689,390.91 | \$ 3,741,252,757.10 | \$ 3,528,378,310.86 | 15.34% | 4.07% | 9.53% |

Tabla 6.16. Costos en pesos colombianos de un pavimento para un tránsito T₄ y diferentes tipos de fibras, suelo y modelo.

| Modelo | Suelo | 5 millones | | | | % (Aumento) o reducción concreto sin adición de fibras | | |
|-----------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|---------|----------------|
| | | Sin Fibra | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
| Cero Mantenimiento | Malo | \$ 3,868,667,727.12 | \$ 4,009,865,244.35 | \$ 3,868,731,122.63 | \$ 4,009,382,278.83 | (3.65%) | (0.00%) | (3.64%) |
| | Regular | \$ 3,333,422,785.65 | \$ 3,202,204,112.39 | \$ 3,201,824,745.58 | \$ 3,333,457,813.71 | 3.94% | 3.95% | (0.00%) |
| | Bueno | \$ 2,393,852,636.03 | \$ 2,394,104,205.53 | \$ 2,393,882,824.37 | \$ 2,393,873,240.77 | (0.01%) | (0.00%) | (0.00%) |
| Calibrado Mecanicista | Malo | \$ 6,141,289,567.65 | \$ 6,015,644,803.34 | \$ 6,014,800,536.10 | \$ 6,014,765,076.78 | 2.05% | 2.06% | 2.06% |
| | Regular | \$ 5,748,487,235.69 | \$ 5,609,766,853.79 | \$ 5,608,989,000.90 | \$ 5,482,353,627.77 | 2.41% | 2.43% | 4.63% |
| | Bueno | \$ 5,216,084,028.58 | \$ 5,077,263,018.89 | \$ 5,076,573,718.46 | \$ 4,949,942,178.77 | 2.66% | 2.67% | 5.10% |
| PCA | Malo | \$ 5,342,684,756.99 | \$ 5,077,288,175.84 | \$ 5,342,781,359.68 | \$ 5,216,147,903.27 | 4.97% | (0.00%) | 2.37% |
| | Regular | \$ 4,949,882,425.03 | \$ 4,723,410,813.22 | \$ 4,836,366,370.70 | \$ 4,722,736,894.46 | 4.58% | 2.29% | 4.59% |
| | Bueno | \$ 4,417,479,217.92 | \$ 4,012,305,662.97 | \$ 4,277,950,794.79 | \$ 4,138,324,858.54 | 9.17% | 3.16% | 6.32% |

En el Anexo A, se encuentran los presupuestos para cada tipo de fibra, modelo, suelo y tráfico.

6.3 Análisis Beneficio – Costo

Una vez calculado los costos en la sección anterior se procedió a realizar el 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, tanto de construcción como de mantenimiento, en valor presente neto para la obtención en términos de porcentajes del beneficio asociado (ver tabla 6.17), donde se refleja que la mejor opción de fibras en el concreto son las de polipropileno, a pesar de su mayor costo en comparación con las tiras de caucho y bolsa de leche.

Tabla 6.16. Porcentaje de costos con respecto a un concreto sin fibras.

| Modelo | Suelo | NE 1MILLÓN | | | NE 5MILLONES | | |
|--------------------------|---------|---------------|---------|----------------|---------------|---------|----------------|
| | | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche | Polipropileno | Caucho | Bolsa de leche |
| Cero Mantenimiento | Malo | (0.01%) | 4.32% | (0.00%) | (3.60%) | (0.00%) | (3.59%) |
| | Regular | (0.01%) | (0.00%) | (0.00%) | 3.88% | 0.01% | (4.05%) |
| | Bueno | (0.01%) | (0.00%) | (0.00%) | (0.01%) | (0.00%) | (0.00%) |
| Calibrado Mecanicista | Malo | 8.30% | 2.71% | 5.61% | 2.03% | 2.04% | 2.04% |
| | Regular | 12.38% | 3.04% | 6.09% | 2.39% | 2.41% | 4.59% |
| | Bueno | 15.59% | 3.73% | 7.26% | 2.64% | 2.65% | 5.05% |
| PCA | Malo | 11.47% | 2.87% | 5.74% | 4.92% | (0.00%) | 2.35% |
| | Regular | 13.40% | 3.46% | 6.71% | 4.53% | 2.27% | 4.54% |
| | Bueno | 15.14% | 4.02% | 9.40% | 9.07% | 3.12% | 6.25% |

En el Anexo B, se encuentran los análisis de beneficio – costo para cada tipo de fibra, modelo, suelo y tráfico.

7. 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 ó estacionamientos.

La aproximación lineal del modelo calibrado mecanicista, es el más conservador de los modelos de fatiga empleados en esta investigación por considerar menores pendientes 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, para con el uso del modelo de cero mantenimiento no se logra reducción de espesores debido a las altas deformaciones en la subrasante.

Las mayores reducciones en los espesores de pavimento con la adición de fibras se dan en tráficos menores y suelos relativamente buenos y más aun 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.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda mejorar las propiedades de los agregados en la elaboración de las mezclas de concreto para garantizar mejores propiedades en cuanto a resistencias y módulos de elasticidad, así como también, pruebas 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, debido a la dispersión en la medida de las resistencias a flexión de las muestras, 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, ó 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.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Bravo, A., Guevara, H., B, et al. (2008). Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamanos de particulas. *Rev. Fac. Ing. UCV*, 23(1), 67-75.
- Altamirano, L. (2007). Deterioro de pavimentos rígidos. *Universidad Nacional de Ingeniería*, 13-23 p.
- Álvarez, P. (2009). *Durability of polypropylene fibre reinforced concrete*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- American Concrete Institute. (1996). State of art Report on Fiber Reinforced Concrete. , *ACI 544.1R-96*. ACI Fannington Hillis, MI.
- Anguas, P., Gómez, J., & Sesma, J. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila.
- ASTM, C. (1998). 150. *Standard Specification for Portland Cement,* American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- Balaguru, P., & Khajuria, A. (1996). Properties of polymeric fiber-reinforced concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1532(-1), 27-35.
- Banthia, N., Al-Asaly, M., & Ma, S. (1995). Behavior of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced plastic grid. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7 (4), 252.
- 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. Volumen, 12*.
- Coró, A. (2002). *Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras PET*. UNIUI, Universidad Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS.

Chandra, S., & Ohama, Y. (1994). *Polymers in concrete*: CRC Press.

Chen, P., & Chung, D. (1996). Comparative study of concretes reinforced with carbon, polyethylene, and steel fibers and their improvement by latex addition. *ACI materials journal*, 93(2).

Diseño PCA. (2004). Control de Mezclas de Concreto. *Steven H. Kostmatka*.

EUCLID-TOXEMENT. ACCELGUARD HE - Acelerante de fraguado para hormigón y mortero. Retrieved 13 de Octubre, 2010, from http://www.toxement.com.co/pdf_2010/Accelguard%20HE.pdf

EUCLID-TOXEMENT. EUCON 37 - Reductor de agua de alto poder. Retrieved 13 de Octubre, 2010, from http://www.toxement.com.co/pdf_2010/Eucon%2037.pdf

Gerwicfc, B. (1978). Applications of polymers to concrete sea structures. *Second Int. Cong. on Polymers in Concrete, Texas*, 37-43.

Hernandez-Olivares, F., Barluenga, G., Bollati, M., & Witoszek, B. (2002). Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(10), 1587-1596.

Hernández-Olivares, F., Barluenga, G., Parga-Landa, B., Bollati, M., & Witoszek, B. (2007). Fatigue behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete and its implications in the design of rigid pavements. *Construction and building materials*, 21(10), 1918-1927.

Hernández, Y., & Torres, A. (2002). *Pavimentos drenantes en concretos con adiciones de tiras de plástico*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Huang, B., Li, G., Pang, S., & Eggers, J. (2004). Investigation into waste tire rubber-filled concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16, 187.

IDU-ET-2005. (2006). Pavimentos de concreto hidráulico, *Capítulo 6* (pp. 48).

Instituto Mexicano Del Cemento y Del Concreto. (1988). *Práctica recomendable para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia del concreto (ACI 214-77)*. México.

Kardon, J. (1997). Polymer-modified concrete: Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9(2), 85-92.

Khaloo, A., Dehestani, M., & Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12), 2472-2482.

Laranjeira, F., Grünwald, S., Walraven, J., Blom, C., Molins, C., & Aguado, A. Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 1-19.

Lavon, B., & Fradua, M. (1998). Las pruebas de cilindros de concreto. *imcyc*.

Maccaferri América Latina. FibroMac® 12 - Fibras para Refuerzo del Concreto. Retrieved 13 de Octubre, 2010, from http://www.maccaferri.com.br/download/E_FibroMac_12.pdf

Maccaferri América Latina. (2007). *Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo de Hormigón* Manual Técnico.

Medina, F., & Cifuentes, H. (2007). *Hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Influencia de la ductilidad de la fibra sobre la fragilidad y el efecto tamaño*.

Medina, L., Pérez, I., Crespo, R., & AEPO, S. (2002). Comprobación estructural de las secciones e firme de la instrucción de carreteras *Revista de Obras Públicas*, 35.

Rebeiz, K., Serhal, S., & Fowler, D. (1994). Structural behavior of polymer concrete beams using recycled plastic. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 6 (1), 150.

Resistencia a Flexión del concreto. Retrieved 22/10/10, from www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf

Reyes, F. (2003). *Diseño racional de pavimentos*: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rincón, J., Romero, M., Hernández-Crespo, M., Talero, R., & García Santos, A. (2004). Microestructura de un material compuesto basado en una matriz de cemento reforzado con fibras de polipropileno. *Materiales de Construcción*, 54(274).

Roesler, J., Altoubat, S., Lange, D., Rieder, K., & Ulrich, G. (2006). Effect of synthetic fibers on structural behavior of concrete slabs-on-ground. *ACI materials journal*, 103(1), 3–10.

Roesler, J., & Rao, S. (2005). Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results. *University of Illinois, Urbana-Champaign*, 22.

Siddique, R., & Naik, T. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview. *Waste Management*, 24(6), 563-569.

Su, Z. (1995). *Microstructure of polymer cement concrete*: Techn. Univ. Delft.

Thomas, C., Carrascal, I., Setién, J., & Polanco, J. (2009). Determinación del límite a fatiga en hormigones reciclados de aplicación estructural. *Anales de Mecánica de la Fractura* 26, 1, 283-288.

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*, 14, 191.

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.

Zagaceta, I., & Romero, R. (2008). *El pavimento de concreto hidráulico premezclado en la modernización y rehabilitación de la avenida Arboledas*. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.

10. ANEXO A

10.1 Presupuesto Modelo Cero Mantenimiento, suelo malo, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.2 Presupuesto Modelo Calibrado Mecanicista, suelo malo, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.3 Presupuesto Modelo PCA, suelo malo, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.4 Presupuesto Modelo Cero Mantenimiento, suelo regular, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.5 Presupuesto Modelo Calibrado Mecanicista, suelo regular, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.6 Presupuesto Modelo PCA, suelo regular, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.7 Presupuesto Modelo Cero Mantenimiento, suelo bueno, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.8 Presupuesto Modelo Calibrado Mecanicista, suelo bueno, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.9 Presupuesto Modelo PCA, suelo bueno, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

10.10 Presupuesto Modelo Cero Mantenimiento, suelo malo, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.11 Presupuesto Modelo Calibrado Mecanicista, suelo malo tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.12 Presupuesto Modelo PCA, suelo malo, tráfico tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.13 Presupuesto Modelo Cero Mantenimiento, suelo regular, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.14 Presupuesto Modelo Calibrado Mecanicista, suelo regular, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.15 Presupuesto Modelo PCA, suelo regular, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.16 Presupuesto Modelo Cero Mantenimiento, suelo bueno, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.17 Presupuesto Modelo Calibrado Mecanicista, suelo bueno, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

10.18 Presupuesto Modelo PCA, suelo bueno, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

11. ANEXO B

11.1 Beneficio- Costo, Modelo Cero Mantenimiento, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

11.2 Beneficio- Costo, Modelo Calibrado Mecanicista, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

11.3 Beneficio- Costo, Modelo PCA, tráfico 1 millón Ejes de 13 ton.

11.4 Beneficio- Costo, Modelo Cero Mantenimiento, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

11.5 Beneficio- Costo, Modelo Calibrado Mecanicista, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.

11.6 Beneficio- Costo, Modelo PCA, tráfico 5 millones Ejes de 13 ton.