

Study of fatigue performance of a concrete mix for pavements reinforced with steel fibers

Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzada con fibras metálicas

D. Ruiz-Valencia ^{1*}, F. Rodríguez **, M. León-Neira *

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

** Holcim (Colombia) S.A. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 31/10/2016

Fecha de Aceptación: 03/02/2017

PAG 45-58

Abstract

The behavior in flexural fatigue tests of concrete containing metal fibers has not been extensively studied. Therefore, this study was considered to determine the effect of incorporating metal fibers in concrete paving in flexural fatigue tests. A concrete mix was designed with modulus of rupture of 4.1 MPa at 28 days, which is dosed metal fibers 35 mm long and 0.5 mm in diameter in three proportions: 20 kg/m³, 40 kg/m³ and 80 kg/m³ and left to a non-corresponding control mixture addition. The fatigue tests were performed on 68 specimens of 100 x 100 x 350 mm, at a frequency of 8 Hz, and stresses between 80% and 90% of the modulus of rupture of each mixture. The Weibull probability distribution were used to calculate the fatigue curves with different failure probabilities. For the stresses ranges studied, the fatigue life does not increase for the mix with fiber content of 20 kg/m³ and increased by 6% to 40 kg/m³ (0.5%) and 25% to 80 kg/m³ (1%) compared to the Control mixture.

Keywords: Steel fiber reinforced concrete, fatigue tests, pavements

Resumen

El comportamiento en ensayos de fatiga por flexión de concretos que contienen fibras metálicas no ha sido ampliamente estudiado. Por esta razón, se planteó este estudio para determinar el efecto de la incorporación de fibras metálicas en concretos para pavimentos en ensayos de fatiga por flexión. Se diseñó una mezcla de concreto con módulo de rotura de 4.1 MPa a 28 días, a la cual se le dosificaron fibras metálicas de 35 mm de largo y 0.5 mm de diámetro en tres proporciones: 20 kg/m³, 40 kg/m³ y 80 kg/m³ y se dejó una sin adición correspondiente a la mezcla de control. Los ensayos de fatiga se realizaron sobre 68 especímenes de 100 x 100 x 350 mm, a una frecuencia de 8 Hz, se aplicaron esfuerzos entre el 80% y 90% del módulo de rotura de cada mezcla. Con la distribución de probabilidad Weibull se calcularon las curvas de fatiga con diferentes probabilidades de falla. En los rangos de esfuerzos estudiados, la vida de fatiga no aumenta para contenido de fibras de 20 kg/m³ y aumenta un 6% para 40 kg/m³ (0.5%) y 25% para 80 kg/m³ (1%) comparado con la mezcla control.

Palabras clave: Concreto reforzado con fibras metálicas, ensayos de fatiga, pavimentos

1. Introducción y antecedentes

Los pavimentos son estructuras que están sometidas a las cargas cíclicas que impone el tránsito de vehículos y a los efectos combinados de la acción del clima (Huang Yang, 2004; LCPC, 1997; Packard, 1984; Papagiannakis y Masad, 2008; Reyes, 2003). En el caso de los pavimentos de concreto, la losa de concreto absorbe la mayor parte de estos esfuerzos generados (Huang Yang, 2004; Packard, 1984). Estos esfuerzos generados en la losa de concreto son principalmente de compresión y flexión (Huang Yang, 2004; Papagiannakis y Masad, 2008), siendo estos últimos los más críticos para el concreto, ya que la resistencia del concreto en flexión es menor que la resistencia en compresión (Bentur y Sidney, 2007; Z. Li, 2011; Mehta y Monteiro, 2006). Esta debilidad del concreto es compensada por el acero de refuerzo, el cual es incorporado al concreto a través de barras de acero corrugado (Concreto reforzado) o fibras metálicas (Concreto fibro reforzado) (Mehta y Monteiro, 2006).

Estas últimas son frecuentemente usadas buscando también un incremento de la resistencia de fatiga (ACI Committee 544, 2009; Bentur y Sidney, 2007; Meda y Plizzari, 2004). Adicionalmente, por la facilidad de instalación y la garantía de quedar dispersas en toda la masa de concreto (Bentur y Sidney, 2007), lo cual no se puede lograr con barras de acero corrugado.

La acción repetida de esfuerzos de flexión genera una pérdida progresiva de las propiedades estructurales del concreto, proceso conocido como fatiga del material (Lee y Barr, 2004; Vassilopoulos, 2010). En los métodos mecanicistas de diseño de pavimentos se utilizan las leyes de fatiga de los materiales para determinar la capacidad del pavimento para resistir los esfuerzos, deformaciones y deflexiones impuestos por el tránsito y el clima (Papagiannakis y Masad, 2008). Tradicionalmente para diseño de pavimentos de concreto se usan modelos de fatiga como el modelo PCA (Portland Cement Association) (Packard, 1984), el MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (MEPDG, 2007), el modelo calibrado mecanicista (US Army Corps of Engineers) (Huang Yang, 2004), método racional francés (LCPC, 1997) y el modelo de cero mantenimiento (Federal Highway Administration) (Huang Yang, 2004). Es importante

¹ Autor de correspondencia:

Profesor Asociado, Director de Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Colombia
E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co



mencionar que estos modelos fueron desarrollados en condiciones y con materiales distintos a los que se encuentran en los países suramericanos. Adicionalmente, fueron desarrollados para concretos sin refuerzo, por lo que resulta necesario desarrollar modelos de fatiga para concretos sin refuerzo y con refuerzo de fibras metálicas con materiales locales que permitan cuantificar el efecto de las fibras metálicas en la vida de fatiga de los materiales.

El interés por el estudio de la fatiga del concreto comenzó en los Estados Unidos a finales del siglo XIX con el desarrollo de los puentes de concreto reforzado para las vías férreas, en los cuales se estudió la fatiga del concreto con carga de compresión (Hsu, 1981). Mientras que el estudio del comportamiento de la fatiga del concreto en ensayos de flexión se inició conjuntamente con el desarrollo del sistema vial de los Estados Unidos a comienzos de 1920 (Hsu, 1981; Shi, Fwa, y Tan, 1993).

La fatiga del concreto da origen a un tipo de deterioro en los pavimentos de concreto que se manifiesta con la rotura de la losa de concreto, generando así una fuente de ingreso de agua y posteriormente la erosión del material de soporte de la losa, lo cual conduce a una destrucción total de la estructura del pavimento (Huang Yang, 2004; Papagiannakis y Masad, 2008).

El comportamiento de la fatiga del concreto es un parámetro importante en el diseño de pavimentos de concreto para carreteras, aeropuertos e instalaciones industriales, por lo que, junto con la erosión del material que soporta la losa, se debe controlar (Huang Yang, 2004; Packard, 1984; Papagiannakis y Masad, 2008; Shi et al., 1993). La erosión del material de soporte se controla usando materiales resistentes a la acción del agua como las mezclas asfálticas o los concretos hidráulicos pobres, aumentando la rigidez de la losa de concreto para que las deflexiones que se transmiten al soporte sean menores y usando dispositivos de transferencia de carga en las discontinuidades de la losa (Huang Yang, 2004; Packard, 1984; Papagiannakis y Masad, 2008). Para controlar el proceso de fatiga del concreto es necesario conocer las propiedades que gobiernan el comportamiento de este fenómeno.

El comportamiento en fatiga normalmente es estudiado en términos del esfuerzo aplicado expresado como un porcentaje del módulo de rotura (conocido como relación de esfuerzos) contra el número de ciclos de carga aplicados a la falla (Johnston y Zemp, 1991; Shi et al., 1993). Los resultados son representados en curvas conocidas como las curvas de Whöler. Para eliminar la influencia de la relación agua-cemento, tipo y granulometría de los agregados, y tipo y cantidad de cemento en el concreto, en las investigaciones se ha optado por usar la relación de esfuerzos antes que el esfuerzo de rotura (Huang y Zhao, 1995; Lee y Barr, 2004; Shi et al., 1993).

En general, los parámetros tales como las condiciones de carga, la frecuencia de carga, nivel de esfuerzos, el número de ciclos, la composición de la matriz y la relación de esfuerzos influirán en el comportamiento a la fatiga de la probeta de concreto, sin embargo, no hay consenso cualitativo y cuantitativo sobre la forma en que estos parámetros influyen el comportamiento a la fatiga del concreto (Lee y Barr, 2004).

Los ensayos de fatiga de concretos consumen grandes recursos en tiempo y dinero, por esta razón para diseño de pavimentos de concreto es común usar curvas de entidades viales como las desarrolladas por PCA (Portland Cement Association) (Packard, 1984), el MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide) de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (MEPDG, 2007), el modelo calibrado mecanicista (US Army Corps of Engineers) (Huang Yang, 2004), método racional francés (LCPC, 1997) y el modelo de cero mantenimiento (Federal Highway Administration) (Huang Yang, 2004).

Debido a que el método racional francés de diseño de pavimentos caracteriza las curvas de fatiga con 2 parámetros de fácil obtención, el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos de carga σ_6 y la pendiente de la curva de fatiga b , esto permite comparar los resultados reportados por diferentes autores. En la Tabla 1 se muestran los parámetros del método racional francés de las curvas de fatiga presentados por algunos autores (Goel et al., 2012; Johnston y Zemp, 1991; Oh, 1991; Shi et al., 1993). Estos resultados servirán de base para comparar los parámetros obtenidos en este estudio.

Tabla 1. Parámetros del modelo racional francés de curvas de fatiga sin fibra

| Autor | Rango evaluado en Relación de esfuerzos (σ/MR) | | MR (MPa) | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6/MR |
|------------------------------|---|------|----------|------------------|--------|------|---------------|
| | | | | | | | |
| Byung Hwan, 1991 | 65% | 85% | 4.54 | 2.80 | -0.052 | 20 | 0.62 |
| Johnston et al., 1991 | 80% | 90% | 4.45 | 3.20 | -0.040 | 25 | 0.72 |
| Shi et al., 1993 | 65% | 90% | 6.04 | 3.50 | -0.042 | 24 | 0.58 |
| Goel et al., 2012 | 65% | 90% | 4.89 | 3.10 | -0.045 | 23 | 0.63 |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 5) | | | | 2.15 | -0.063 | 16 | |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 4) | | | | 1.95 | -0.067 | 15 | |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 3) | | | | 1.63 | -0.067 | 15 | |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 2) | | | | 1.37 | -0.071 | 14 | |
| PCA, 1984 | 45% | 100% | | | | | 0.50 |

2. Metodología

Para cumplir con los objetivos de este trabajo se realizó una caracterización físico-química de la grava, la arena y el cemento utilizado; con estos materiales se realizó, por medio del método ACI-211.1, el diseño de una mezcla de concreto para pavimentos que cumpliera con una resistencia mínima a la flexión de 4.1 MPa a 28 días y un asentamiento a 125 mm. Se fabricaron mezclas de concreto con contenidos de fibra metálica de 20 kg/m³, 40 kg/m³, 80 kg/m³ y mezclas de control sin fibras. A cada una de las mezclas en estado plástico se le efectuaron pruebas de asentamiento, contenido de aire y masa unitaria. En estado endurecido se midieron resistencias a la compresión y módulos de elasticidad en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto, y módulos de rotura en vigas de 150 mm x 150 mm x 550 mm. Las pruebas de fatiga por flexión se realizaron en un sistema dinámico MTS sobre especímenes de 100 mm x 100 mm x 350 mm. La carga se aplicaba en los tercios medios de la luz libre y la magnitud correspondía al 90% y 80% de la carga máxima del módulo de rotura. La velocidad de aplicación de la carga dinámica fue 8 Hz y la relación entre el mínimo esfuerzo aplicado y el máximo esfuerzo aplicado por ciclo de carga se fijó en 0.01. Los ciclos de carga hasta la rotura de cada esfuerzo de carga aplicado se procesaron estadísticamente para ajustarlo a una función distribución Weibull y de esta forma involucrar parámetros de probabilidad de falla para predecir los ciclos de carga hasta la rotura para una probabilidad de falla definida. Con estos valores se dibujaron las curvas de fatiga y se calcularon los esfuerzos de rotura para un millón de ciclos de carga (σ_6) y las pendientes de las leyes de fatiga b .

2.1 Caracterización físico – química de materiales y diseño de mezcla

Los materiales para producir el concreto usado en las pruebas de fatiga, se seleccionaron condicionándolos al cumplimiento de los requisitos de la especificación 600-11 del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá D.C. Las gravas y las arenas provenían de una fuente aluvial del Departamento del Tolima.

Las pruebas realizadas en las gravas y arenas se indican en la Tabla 2.

El cemento usado fue tipo 1M (según NTC-30), con adición de escoria del 15%, la cual cumple con la NTC-4018. Las pruebas realizadas al cemento son las mencionadas en la NTC-121 y NTC-321. El agua usada para el mezclado y curado de las muestras es la que proviene del acueducto de Bogotá D.C. para consumo humano. En el caso de los aditivos, se usaron dos aditivos, un plastificante de alto rango y un reductor de agua, los cuales cumplen con la NTC-1299 y ASTM C-494, respectivamente. A estos aditivos no se le realizaron pruebas de control, ya que fueron entregados certificados por el proveedor. Las fibras metálicas utilizadas son de acero de bajo carbono estirado en frío, sin galvanizado, cuya resistencia a la tracción, según reporte del fabricante es de 1100 MPa, tienen una longitud de 35 mm y un diámetro de 0.55 mm, las cuales en los extremos estaban dobladas en forma de gancho. Las fibras están unidas con un pegante que se deshace una vez entra en contacto con el agua de mezclado. Estas fibras son fabricadas para cumplir la especificación ASTM-A820.

El diseño de la mezcla de concreto se realizó siguiendo el procedimiento ACI-211.1, como dato de entrada para el diseño de mezcla de concreto se estableció una resistencia a la flexión de 4.1 MPa a 28 días con un asentamiento de 125 mm. Esta resistencia del concreto se estableció teniendo en cuenta que es la más usada para la construcción de pavimentos en la ciudad de Bogotá D.C. Cabe anotar que en el procedimiento ACI 211.1 el dato de entrada es la resistencia a la compresión, por esta razón se usó la ecuación 1, la cual expresa una correlación tomada del Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (2010).

$$MR = 0.62\sqrt{f'c} \quad (1)$$

Donde, MR es el módulo de rotura requerido en MPa y $f'c$ es la resistencia a la compresión requerida MPa. Las cuantías de fibra seleccionadas para la fabricación de los especímenes se establecieron en 20 kg/m³, 40 kg/m³ y 80 kg/m³. Estas dosificaciones se establecieron para abarcar desde la mínima recomendada por el fabricante de la fibra hasta el doble de la máxima recomendada por el fabricante de la fibra. Adicionalmente, se conformaron muestras de control sin fibras para cuantificar las variaciones en las propiedades estudiadas.

Tabla 2. Pruebas realizadas a las gravas y arenas

| Ensayos a las gravas y arenas | Norma de ensayo |
|--|-----------------|
| Análisis petrográfico | ASTM C-295 |
| Granulometría | INV E-213-07 |
| Desgaste Los Ángeles | INV E-218-07 |
| Micro Deval | INV E-238-07 |
| 10% de Finos | INV E-224-07 |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos (Magnesio) | INV E-220-07 |
| Terrones arcilla y partículas deleznable | INV E-211-07 |
| Partículas livianas | INV E-221-07 |
| Partículas fracturadas mecánicamente | INV E-227-07 |
| Índice de aplanamiento | INV E-230-07 |
| Índice de alargamiento | INV E-230-07 |
| Contenido de sulfatos | INV E-233-07 |
| Límite Líquido* | INV E-125-07 |
| Índice de Plasticidad* | INV E-126-07 |
| Equivalente de arena* | INV E-133-07 |
| Valor de azul de metileno* | INV E-235-07 |
| Material que pasa el tamiz de 75µm (No.200)* | INV E-214-07 |
| Materia Orgánica* | INV E-212-07 |
| Absorción de agua* | INV E-222-07 |
| Reactividad | INV E-234-07 |



2.2 Pruebas en estado plástico y ensayos mecánicos en estado endurecido

El plan de ensayos de laboratorio establece dos momentos de la mezcla del concreto, el primero corresponde al estado de la mezcla plástica o fresca y el segundo al estado de la mezcla endurecida a diferentes edades. En estado plástico al concreto se le realizaron pruebas, según se muestra en la Tabla 3 y en estado endurecido en la Tabla 4.

Las pruebas de asentamiento del concreto con fibras se realizaron siguiendo el procedimiento de la NTC-396 y no con el ensayo ASTM-C995, teniendo en cuenta lo señalado por el Comité ACI-544 (citado por Bentur y Sidney, 2007) en donde se indica que una vez establecida una satisfactoria manejabilidad en una mezcla de concreto con fibras y el control se ha realizado con el ensayo de asentamiento, este se puede utilizar para monitorear la consistencia de las mezclas con fibras. Esto permitió mantener un parámetro de comparación con la muestra control.

2.3 Pruebas de fatiga

Los ensayos de fatiga se realizaron sobre especímenes prismáticos de 100 mm x 100 mm x 350 mm, estos especímenes experimentaron previamente al ensayo un proceso de curado en inmersión en agua en condiciones controladas de acuerdo con la NTC-550. Por consiguiente, al momento del ensayo de fatiga los especímenes se encontraban húmedos.

Se verificó entonces que la dimensión mínima fuera mayor a 3 veces el tamaño máximo de la grava, la cual era de 25 mm, por lo que la dimensión mínima debería ser 75 mm. Sin embargo, teniendo en cuenta que la longitud de la fibra metálica era de 35 mm, esta dimensión se amplió a 100 mm para evitar un direccionamiento en la orientación de las fibras.

El número de viguetas fabricadas fue de 96, de las cuales 28 se ensayaron en modo estático (carga monotónica) para obtener el módulo de rotura de las vigas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 350 mm y 68 en modo dinámico (carga cíclica) para encontrar el número de ciclos de carga a la falla. Para obtener el módulo de rotura en las vigas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 350 mm, se aplicó una carga monotónica a una velocidad normalizada de 1 MPa/min hasta la rotura.

Una vez obtenida la carga de rotura, este valor se utilizó para hallar la carga de referencia para los especímenes sometidos a fatiga, la que corresponde al 90% al 95% y 80% al 85% de la carga de rotura. Los especímenes se sometieron a un modo de carga por esfuerzo controlado aplicado en los tercios de la luz a una frecuencia de aplicación de carga de 8 Hz. La relación entre el mínimo esfuerzo aplicado y el máximo esfuerzo aplicado por ciclo de carga se fijó en 0.01.

El equipo usado para realizar los ensayos de fatiga fue un sistema MTS con capacidad de aplicación de carga de 100 kN.

Tabla 3. Pruebas realizadas al concreto en estado fresco

| Ensayos al concreto fresco | Norma de ensayo |
|-----------------------------------|-----------------|
| Asentamiento del concreto (slump) | NTC-396 |
| Masa unitaria | NTC-1926 |
| Contenido de aire | NTC-1032 |

Tabla 4. Pruebas realizadas al concreto endurecido

| Ensayos al concreto endurecido | Norma de ensayo |
|--|-----------------|
| Resistencia a la compresión simple de cilindros | NTC-673 |
| Resistencia a la flexión del concreto (Carga en los tercios de la luz) | NTC-2871 |
| Módulo elástico del concreto | NTC-4025 |

2.4 Análisis estadístico de resultados

Los resultados de fatiga se procesaron usando la distribución de probabilidad Weibull, teniendo en cuenta lo señalado por Gumble (citado por Singh y Kaushik, 2000) en donde se comenta que la función de amenaza o función de riesgo de la distribución log normal decrece con el incremento del tiempo o la vida.

Para obtener la función de distribución de probabilidad Weibull, se requiere encontrar los parámetros de forma de la función (α) y de vida característica o parámetro de escala (u), a partir de las Ecuaciones 2 y 3.

$$\alpha = (COV)^{-1.08} \quad (2)$$

Donde, COV es el coeficiente de variación del número de ciclos a la falla a una determinada carga aplicada.

$$u = \frac{\mu}{Gamma\left(\frac{1}{\alpha}+1\right)} \quad (3)$$

En la Ecuación 3, μ es el promedio del número de ciclos a la falla a una carga aplicada, Gamma es la función estadística Gamma y α fue definido previamente.

Para involucrar probabilidad de falla (Pf) en el cálculo del número de ciclos a la falla a una carga aplicada, se

adoptó la Ecuación 4 según el modelo propuesto por Singh y Kaushik (2000):

$$n = \ln^{-1} \left(\frac{\ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-P_f} \right) \right) + \alpha \ln(u)}{\alpha} \right) \quad (4)$$

Donde n es el número de ciclos a la falla a una carga aplicada para una probabilidad de falla. De cada curva, se calculó el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos de carga (σ_o) y la pendiente de la ley de fatiga b.

3. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados de la ejecución de cada una de las actividades definidas en la metodología del trabajo.

3.1 Caracterización físico – química de materiales y diseño de mezclas

La Tabla 5 muestra los resultados de los ensayos realizados en las gravas. La granulometría obtenida se presenta en la Figura 1.

Tabla 5. Resultados pruebas realizadas a las gravas

| Ensayos a las gravas | Norma de ensayo | Requisito | Resultado |
|--|-----------------|---------------------|-------------|
| Análisis petrográfico | ASTM C-295 | Minerales reactivos | Ninguno |
| Desgaste Los Ángeles | INV E-218-07 | Máx. 30% | 23.4% |
| Micro Deval | INV E-238-07 | Máx. 25% | 22.7% |
| 10% de Finos | INV E-224-07 | Mín. 75 kN | 274 |
| Relación húmedo/seco | | Mín. 75% | 95% |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos (Magnesio) | INV E-220-07 | Máx. 18% | 4.2% |
| Terrones arcilla y partículas deleznales | INV E-211-07 | Máx. 0.25% | 0.03% |
| Partículas livianas | INV E-221-07 | Máx. 1% | 0% |
| Partículas fracturadas mecánicamente - 1 cara | INV E-227-07 | Mín. 85% | 100% |
| Partículas fracturadas mecánicamente - 2 caras | | Mín. 70% | 100% |
| Índice de aplanamiento | INV E-230-07 | Máx. 20% | 17% |
| Índice de alargamiento | INV E-230-07 | Máx. 20% | 19% |
| Contenido de sulfatos | INV E-233-07 | Máx. 1% | 0.0001% |
| Reactividad | INV E-234-07 | No reactivo | No reactivo |

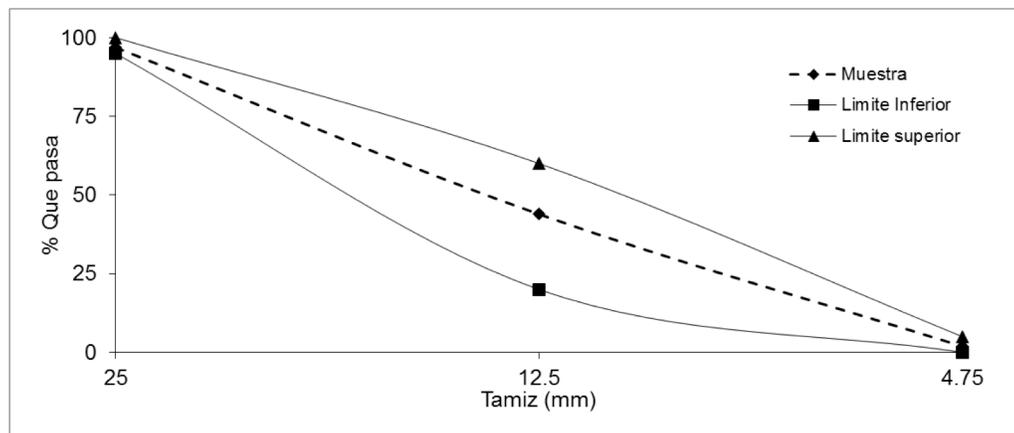


Figura 1. Granulometría de las gravas – Límites especificación IDU 600-11



La Tabla 6 muestra los resultados de los ensayos realizados en la arena, y la Figura 2 presenta la granulometría obtenida.

Los resultados de los ensayos químicos sobre el cemento se encuentran en la Tabla 7. Los resultados de las pruebas físicas y mecánicas del cemento se presentan en la Tabla 8.

El diseño de la mezcla de concreto se realizó siguiendo el procedimiento ACI-211.1, y fue ajustado con la

incorporación de un aditivo reductor de agua (0.45% del peso del cemento) y un aditivo plastificante de alto rango (0.15% del peso del cemento). La dosificación de los aditivos se tomó según recomendación del fabricante. Las proporciones usadas en la mezcla de concreto son indicadas en la Tabla 9.

Se realizó la verificación del diseño ensayando vigas de 150 mm x 150 mm x 550 mm a 3 días, 7 días y 28 días. Los resultados se muestran en la Figura 3.

Tabla 6. Resultados pruebas realizadas a las arenas

| Ensayos a las arenas | Norma de ensayo | Requisito | Resultado |
|--|-----------------|---------------------|-------------|
| Análisis petrográfico | ASTM C-295 | Minerales reactivos | Ninguno |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos (Magnesio) | INV E-220-07 | Máx. 15% | 6% |
| Límite Líquido | INV E-125-07 | No plástico | No plástico |
| Índice de Plasticidad | INV E-126-07 | No plástico | No plástico |
| Equivalente de arena | INV E-133-07 | Mín. 50% | 63% |
| Valor de azul de metileno | INV E-235-07 | Máx. 5% | 2% |
| Terrones arcilla y partículas deleznable | INV E-211-07 | Máx. 1% | 0.5% |
| Partículas livianas | INV E-221-07 | Máx. 0.5% | 0% |
| Material que pasa el tamiz de 75µm (No.200) | INV E-214-07 | Máx. 5% | 4.69% |
| Materia Orgánica | INV E-212-07 | Máx. placa No. 3 | Placa No. 1 |
| Contenido de sulfatos | INV E-233-07 | Máx. 1.2% | 0% |
| Reactividad | INV E-234-07 | No reactivo | No reactivo |
| Absorción de agua | INV E-222-07 | Máx. 4% | 1% |

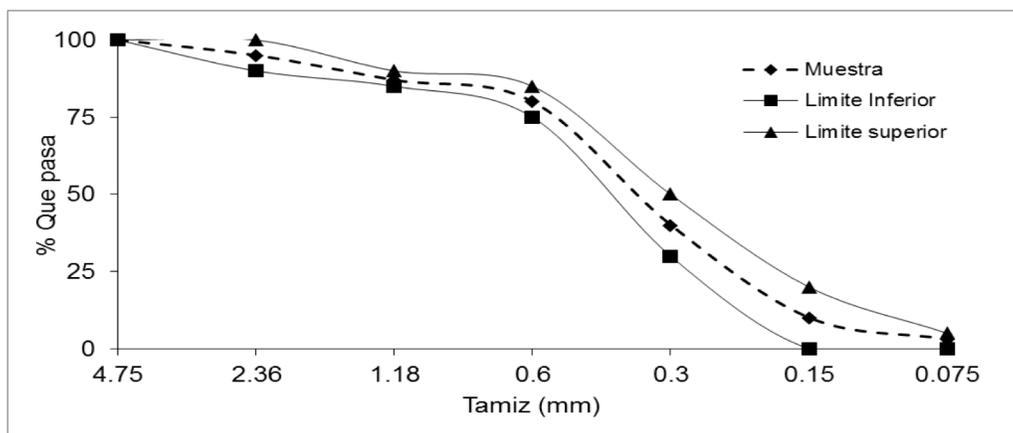


Figura 2. Granulometría de las arenas – Límites especificación IDU 600-11

Tabla 7. Resultados pruebas químicas en el cemento

| Propiedades químicas | Requisito NTC-321 | Resultado | Verificación |
|----------------------|-------------------|-----------|--------------|
| MgO | 7% máx. | 0.91% | Cumple |
| SO ₃ | 3.5% máx. | 2.3% | Cumple |
| Pérdida al fuego | 5% máx. | 1.16% | Cumple |
| Residuo insoluble | 4% máx. | 1.25% | Cumple |

Tabla 8. Resultados pruebas físicas y mecánicas en el cemento

| Propiedades físicas y mecánicas | Requisito NTC-121 | Resultado | Verificación |
|------------------------------------|------------------------|-------------|--------------|
| Finura (Blaine) | 280 m ² /kg | 418 | Cumple |
| Retenido en tamiz No. 325 | | 1.11% | Cumple |
| Expansión en autoclave | 0.8% máx. | 0.003% | Cumple |
| Fraguado inicial Vicat | 45 minutos mín. | 117 minutos | Cumple |
| Fraguado final Vicat | 8 horas máx. | 2.84 horas | Cumple |
| Resistencia a la compresión 3 días | 12.5 MPa mín. | 28.7 MPa | Cumple |
| Resistencia a la compresión 7 días | 19.5 MPa mín. | 38.5 MPa | Cumple |

Tabla 9. Diseño de mezcla de concreto

| Material | Unidad | Cantidad |
|-----------------------------------|--------|---------------|
| Cemento tipo 1M | kg | 400 |
| Grava | kg | 1180 |
| Arena | kg | 686 |
| Agua | kg | 170 |
| Reductor de agua | kg | 1.8 |
| Plastificante de alto rango | kg | 0.6 |
| Total para 1 m³ | | 2438.4 |

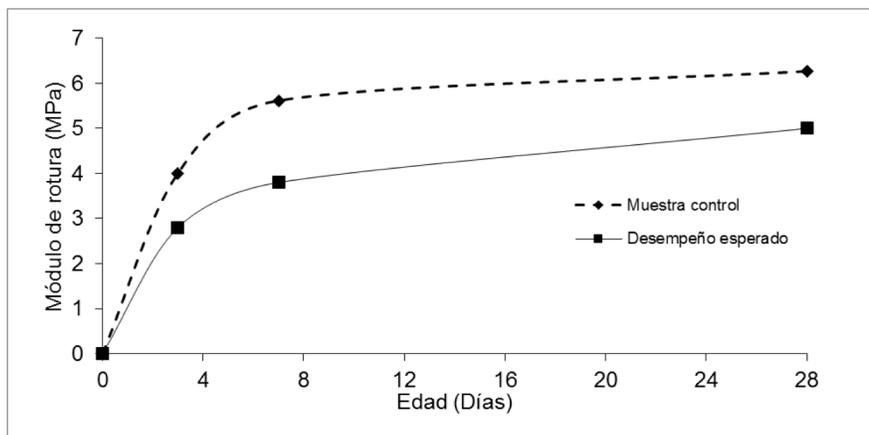


Figura 3. Verificación del diseño de mezcla



3.2 Pruebas en estado plástico y ensayos mecánicos en estado endurecido

Los resultados de los ensayos de las muestras en estado plástico se muestran en la Tabla 10.

Los ensayos en estado endurecido tuvieron los resultados en la tabla 11 en cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto, y vigas de 150 mm x 150 x 550 mm.

3.3 Pruebas de fatiga

Los resultados obtenidos durante los ensayos de fatiga en los especímenes de 100 mm x 100 mm x 350 mm con las diferentes cuantías de fibra y la muestra control se presentan en las Figuras 4, 5, 6 y 7. El esfuerzo de rotura para 1 ciclo de carga corresponde al obtenido en los especímenes de 100 mm x 100 mm x 350 mm.

Tabla 10. Resultados pruebas realizadas al concreto en estado fresco

| Descripción | Asentamiento (mm) | % Aire | Masa unitaria (kg/m ³) |
|------------------------------|-------------------|--------|------------------------------------|
| Muestra control | 125 | 1.55% | 2372 |
| Muestra 20 kg/m ³ | 125 | 2.00% | 2342 |
| Muestra 40 kg/m ³ | 100 | 2.70% | 2412 |
| Muestra 80 kg/m ³ | 90 | 4.95% | 2351 |

Tabla 11. Resultados pruebas realizadas al concreto endurecido

| Descripción | Resistencia a la compresión a 7 días (MPa) | Resistencia a la compresión a 28 días (MPa) | Módulo de rotura a 7 días (MPa) | Módulo de rotura a 28 días (MPa) | Módulo elástico a 28 días (MPa) |
|------------------------------|--|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Muestra control | 52.61 | 65.81 | 5.61 | 6.26 | 23193 |
| Muestra 20 kg/m ³ | 50.22 | 65.28 | 6.11 | 6.81 | 25551 |
| Muestra 40 kg/m ³ | 50.45 | 65.31 | 6.34 | 7.05 | 27938 |
| Muestra 80 kg/m ³ | 51.35 | 66.11 | 7.45 | 8.33 | 29745 |

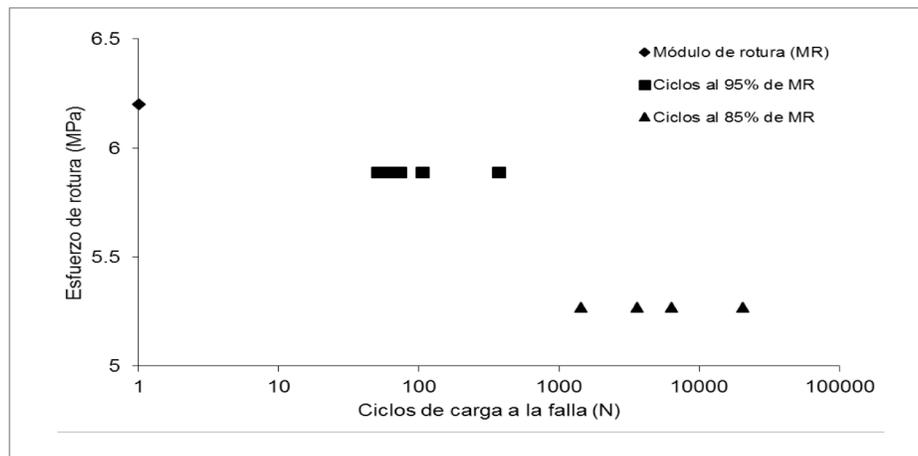


Figura 4. Resultados ensayos de fatiga muestra control

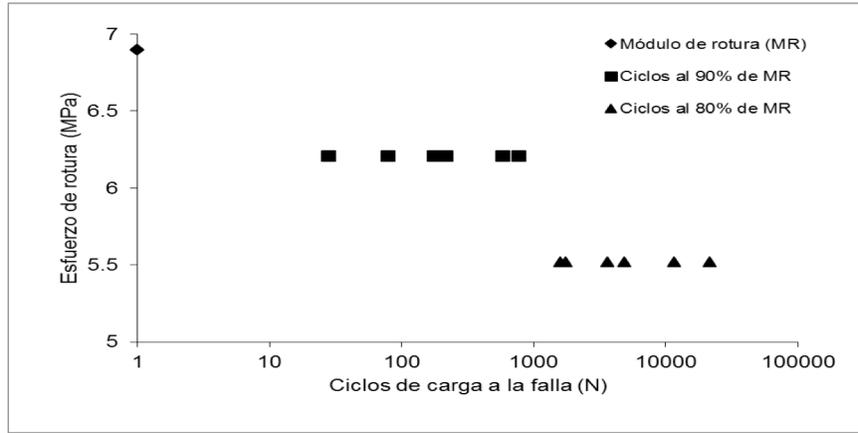


Figura 5. Resultados ensayos de fatiga muestra con 20 kg/m³ de fibras

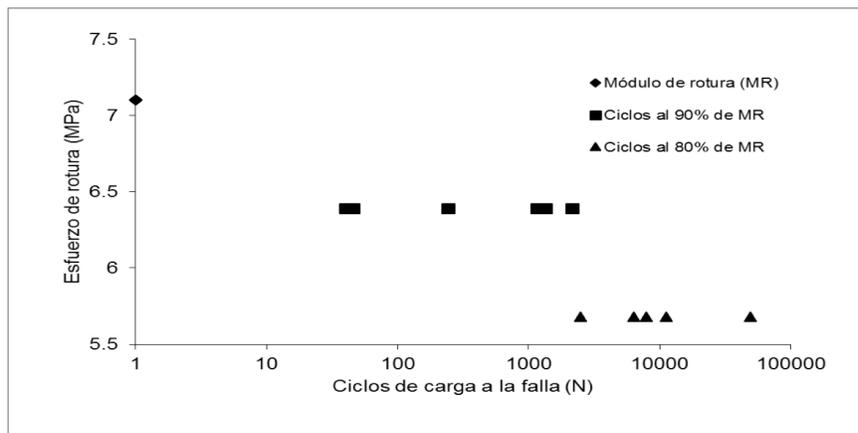


Figura 6. Resultados ensayos de fatiga muestra con 40 kg/m³ de fibras

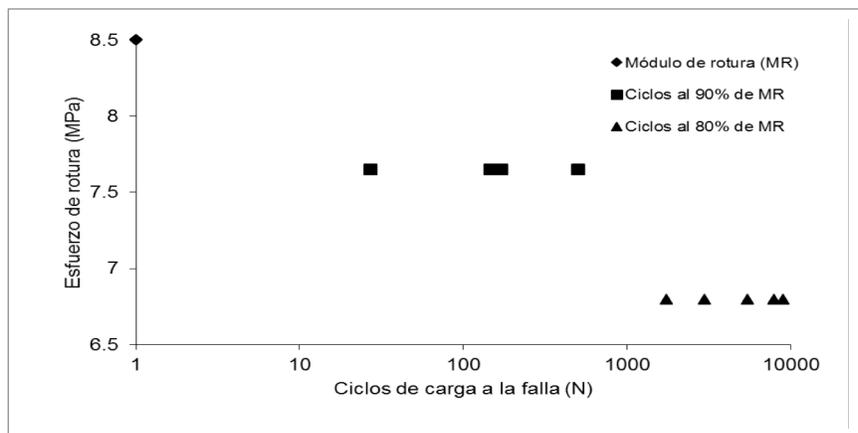


Figura 7. Resultados ensayos de fatiga muestra con 80 kg/m³ de fibras

3.4 Análisis estadístico de resultados

Los parámetros de la distribución Weibull α , u y la predicción del número de ciclos con un 50%, 80% y 90% de probabilidad de falla para cada esfuerzo de rotura (n) se muestran en la Tabla 12.

Con los datos anteriores se dibujaron las curvas de fatiga para cada tipo de mezcla con las diferentes probabilidades de falla. Estas curvas son presentadas en las Figura 8, 9 y 10 junto con la ecuación de regresión que mejor las representa.

Tabla 12. Parámetros Weibull para cada tipo de mezcla

| Muestra | Esfuerzo de rotura (MPa) | α | u | $n (P_f 50\%)$ | $n (P_f 80\%)$ | $n (P_f 90\%)$ |
|------------------------|--------------------------|----------|-------|----------------|----------------|----------------|
| Control | 6.20 | | | 1 | 1 | 1 |
| | 5.89 | 0.976 | 131 | 90 | 29 | 14 |
| | 5.27 | 0.92 | 7669 | 5149 | 1502 | 665 |
| M 20 kg/m ³ | 6.90 | | | 1 | 1 | 1 |
| | 6.21 | 1.033 | 311 | 219 | 73 | 36 |
| | 5.52 | 0.959 | 7314 | 4992 | 1531 | 700 |
| M 40 kg/m ³ | 7.10 | | | 1 | 1 | 1 |
| | 6.39 | 0.963 | 819 | 560 | 173 | 80 |
| | 5.68 | 0.789 | 13549 | 8515 | 2025 | 783 |
| M 80 kg/m ³ | 8.50 | | | 1 | 1 | 1 |
| | 7.65 | 1.043 | 215 | 152 | 51 | 25 |
| | 6.80 | 1.823 | 6089 | 4981 | 2675 | 1773 |

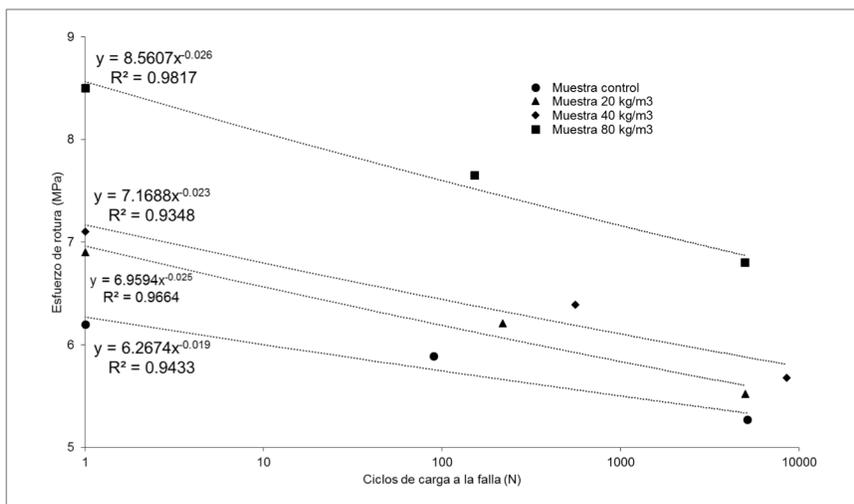


Figura 8. Curvas de fatiga con un 50% de probabilidad de falla

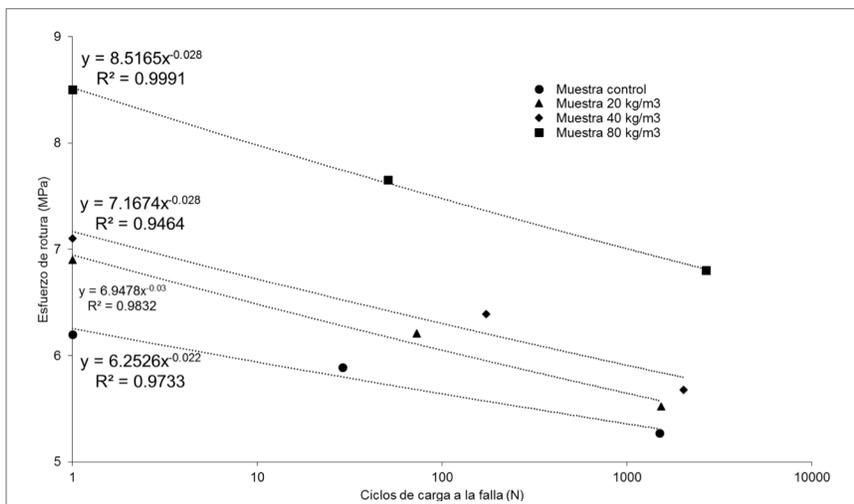


Figura 9. Curvas de fatiga con un 80% de probabilidad de falla

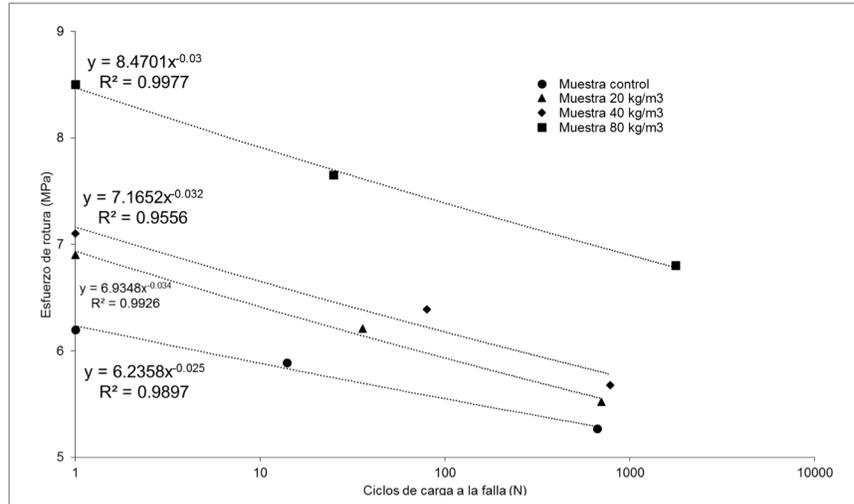


Figura 10. Curvas de fatiga con un 90% de probabilidad de falla

De cada una de las curvas se requiere encontrar el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos (σ_6) y la pendiente de la curva de fatiga (b). Estos parámetros se obtuvieron aplicando la ecuación de regresión para un millón de ciclos de carga y tomando el inverso negativo del exponente de la ecuación de regresión. Los parámetros obtenidos para cada probabilidad de falla considerada, son presentados en la Tabla 13, 14 y 15. La columna llamada variación σ_6 , es el resultado de comparar el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos (σ_6) de las mezclas con fibra con el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos (σ_6) de la mezcla control.

El promedio de la variación del esfuerzo de rotura para un millón de ciclos (σ_6) de las mezclas con fibra comparada con la mezcla control, se muestra en la Tabla 16.

En esta parte del artículo se realizará el análisis de los resultados obtenidos en esta investigación y el contraste con los resultados reportados por investigaciones con objetivos similares. La Tabla 17 muestra la equivalencia entre los contenidos de fibra metálica en kg/m^3 y en porcentaje en volumen. Esta conversión servirá para realizar las comparaciones de los resultados obtenidos por diversos autores.

Tabla 13. Parámetros de las curvas de fatiga con 50% de probabilidad de falla

| Muestra | % Fibra | MR (MPa) | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6 /MR | Variación σ_6 |
|----------------------------|---------|----------|------------------|--------|------|----------------|----------------------|
| Muestra control | 0.00% | 6.20 | 4.82 | -0.019 | 53 | 0.78 | 0% |
| Muestra 20 kg/m^3 | 0.25% | 6.90 | 4.93 | -0.025 | 40 | 0.71 | 2% |
| Muestra 40 kg/m^3 | 0.50% | 7.10 | 5.22 | -0.023 | 43 | 0.73 | 8% |
| Muestra 80 kg/m^3 | 1.00% | 8.50 | 5.98 | -0.026 | 38 | 0.70 | 24% |

Tabla 14. Parámetros de las curvas de fatiga con 80% de probabilidad de falla

| Muestra | % Fibra | MR (MPa) | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6 /MR | Variación σ_6 |
|----------------------------|---------|----------|------------------|--------|------|----------------|----------------------|
| Muestra control | 0.00% | 6.20 | 4.61 | -0.022 | 45 | 0.74 | 0% |
| Muestra 20 kg/m^3 | 0.25% | 6.90 | 4.59 | -0.03 | 33 | 0.67 | 0% |
| Muestra 40 kg/m^3 | 0.50% | 7.10 | 4.87 | -0.028 | 36 | 0.69 | 6% |
| Muestra 80 kg/m^3 | 1.00% | 8.50 | 5.79 | -0.028 | 36 | 0.68 | 25% |

Tabla 15. Parámetros de las curvas de fatiga con 90% de probabilidad de falla

| Muestra | % Fibra | MR (MPa) | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6 /MR | Variación σ_6 |
|----------------------------|---------|----------|------------------|--------|------|----------------|----------------------|
| Muestra control | 0.00% | 6.20 | 4.42 | -0.025 | 40 | 0.71 | 0% |
| Muestra 20 kg/m^3 | 0.25% | 6.90 | 4.34 | -0.034 | 29 | 0.63 | -2% |
| Muestra 40 kg/m^3 | 0.50% | 7.10 | 4.61 | -0.032 | 31 | 0.65 | 4% |
| Muestra 80 kg/m^3 | 1.00% | 8.50 | 5.60 | -0.03 | 33 | 0.66 | 27% |



Tabla 16. Promedio de la variación de σ_6 de las probabilidades de falla consideradas

| Muestra | % Fibra | MR (MPa) | Promedio de variación de σ_6 |
|------------------------------|---------|----------|-------------------------------------|
| Muestra control | 0.00% | 6.20 | 0% |
| Muestra 20 kg/m ³ | 0.25% | 6.90 | 0% |
| Muestra 40 kg/m ³ | 0.50% | 7.10 | 6% |
| Muestra 80 kg/m ³ | 1.00% | 8.50 | 25% |

Tabla 17. Equivalencia entre contenidos de fibra metálica

| Muestra | Porcentaje en volumen (%) |
|------------------------|---------------------------|
| Control | 0.00% |
| M 20 kg/m ³ | 0.25% |
| M 40 kg/m ³ | 0.50% |
| M 80 kg/m ³ | 1.00% |

Inicialmente se analizarán los resultados obtenidos en las mediciones de propiedades básicas del material en estado plástico y en estado endurecido, posteriormente se examinarán los resultados de las curvas de fatiga, para este análisis se extractaron de las curvas reportadas por otros investigadores los parámetros con los que el método de diseño racional francés caracteriza las curvas de fatiga de materiales cementados, el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos (σ_6) y la pendiente de la ley de fatiga (b).

El asentamiento de las mezclas de concreto tuvo una reducción de 25 mm para un contenido de fibras de 40 kg/m³ (0.5%) y 35 mm en la mezcla con 80 kg/m³ (1.0%), este último dato coincide con la reducción de asentamiento reportada por Jun y Stang (1998), quienes trabajaron con el mismo contenido de fibra metálica. En general las pérdidas de asentamiento encontradas en esta investigación, están dentro del rango de reducción reportado por ACI 544.1R (2009), en el cual se comenta que con la incorporación de fibras metálicas entre 0.25% y 1.5% la reducción de asentamiento estará entre 25 mm y 102 mm.

Las mediciones de contenido de aire muestran que las mezclas de concreto con fibras metálicas aumentan el contenido de aire a medida que se incorporan fibras metálicas, lo cual coincide con lo informado por ACI 544.1R (2009).

Los resultados de resistencia a la compresión no presentan variación significativa en las mezclas de concreto con diferentes contenidos de fibras, lo cual corrobora las investigaciones realizadas por diversos autores (ACI Committee 544, 2009; Bentur y Sidney, 2007; Goel et al., 2012; Grzybowski y Meyer, 1993; Huang y Zhao, 1995; Jun y Stang, 1998; Lee y Barr, 2004; Naaman y Hammoud, 1998; Singh y Kaushik, 2000; Singh et al., 2005).

El módulo de rotura se incrementó con la incorporación de fibras metálicas en un 9% para un contenido de fibras de 20 kg/m³ (0.25%), 13% para la mezcla con 40 kg/m³ (0.5%) y 33% en la mezcla con 80 kg/m³ (1.0%) con respecto a la mezcla control. Estos incrementos en el módulo de rotura están dentro del rango de incrementos en el módulo de rotura entre 10% y 35% para contenidos de fibra entre 0.5% y 1% encontrados por Johnston y Zemp (1991), Huang y Zhao (1995), Jun y Stang (1998), Naaman y Hammoud (1998), Singh et al. (2005) y Goel et al. (2012).

Los módulos de elasticidad medidos en esta investigación aumentaron un 10% para la mezcla con 20 kg/m³ (0.25%), 20% para la mezcla con 40 kg/m³ (0.5%) y 28% para la mezcla con 80 kg/m³ (1.0%) con respecto a la muestra control. Según ACI 544.1R (2009) por debajo de 2% de fibra el módulo de elasticidad no aumenta significativamente. Sin embargo, ACI 544.1R (2009) no indica los órdenes de magnitud de los módulos de elasticidad.

El promedio de la variación de la vida de fatiga en las probabilidades de falla consideradas indica que la vida de fatiga no aumenta en la mezcla con contenido de fibras de 20 kg/m³ (0.25%), mientras que para la mezcla con 40 kg/m³ (0.5%) aumenta un 6% y 25% en la mezcla con 80 kg/m³ (1.0%) con respecto a la mezcla control. Estos resultados muestran el efecto de la incorporación de fibras metálicas en el concreto en la vida a fatiga, lo cual se traduce en un mejor desempeño ante cargas cíclicas a partir de contenidos de fibras metálicas superiores a 40 kg/m³ (0.5%).

Como se mencionó en el marco teórico, la comparación realizada con los datos reportados en las diversas publicaciones que existen sobre el tema, está enfocada a conocer los órdenes de magnitud y las tendencias de las curvas de fatiga, ya que en ausencia de una norma universal de ensayo para medir fatiga, las condiciones de ensayo difieren entre las investigaciones analizadas. Entre las diferencias se destacan los tipos de carga, las dimensiones de los especímenes ensayados, el tipo de fibra, las cuantías de fibra, el módulo de rotura del concreto y el rango de esfuerzos aplicados para medir las fatigas.

Los parámetros que caracterizan las curvas de fatiga en el método racional francés (esfuerzos para un millón de ciclos (σ_6) y las pendientes de las curvas de fatiga (b)) fueron calculados con los datos publicados. En el caso de los concretos sin fibra Tabla 18 muestra los resultados extraídos de las referencias (Goel et al., 2012; Johnston y Zemp, 1991; Oh, 1991; Shi et al., 1993).

Se observa que el esfuerzo de rotura para un millón de ciclos (σ_6) es más alto que los reportados por las referencias citadas, sin embargo al dividirlo entre el módulo de rotura, se puede evidenciar que los resultados son similares. La Tabla 19 presenta los resultados extraídos de las referencias para concretos con contenidos de fibras metálicas de 40 kg/m³ (0.5%) (Goel et al., 2012; Singh y Kaushik, 2003).

Tabla 18. Propiedades de las curvas de fatiga de mezclas sin fibra

| Autor | Rango evaluado en Relación de esfuerzos (σ/MR) | | MR (MPa) | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6/MR |
|--|---|------------|-------------|------------------|---------------|-----------|---------------|
| | | | | | | | |
| Byung Hwan, 1991 | 65% | 85% | 4.54 | 2.80 | -0.052 | 20 | 0.62 |
| Johnston et al., 1991 | 80% | 90% | 4.45 | 3.20 | -0.040 | 25 | 0.72 |
| Shi et al., 1993 | 65% | 90% | 6.04 | 3.50 | -0.042 | 24 | 0.58 |
| Goel et al., 2012 | 65% | 90% | 4.89 | 3.10 | -0.045 | 23 | 0.63 |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 5) | | | | 2.15 | -0.063 | 16 | |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 4) | | | | 1.95 | -0.067 | 15 | |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 3) | | | | 1.63 | -0.067 | 15 | |
| LCPC - SETRA, 1997 (Clase 2) | | | | 1.37 | -0.071 | 14 | |
| PCA, 1984 | 45% | 100% | | | | | 0.50 |
| Muestra control - P_f 50% | 85% | 95% | 6.20 | 4.82 | -0.019 | 53 | 0.78 |
| Muestra control - P_f 80% | 85% | 95% | 6.20 | 4.61 | -0.022 | 45 | 0.74 |
| Muestra control - P_f 90% | 85% | 95% | 6.20 | 4.42 | -0.025 | 40 | 0.71 |

Tabla 19. Propiedades de las curvas de fatiga de mezclas con 0.5%

| Autor | Rango evaluado en Relación de esfuerzos (σ/MR) | | MR (MPa) | % Fibra | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6/MR |
|--|---|------------|-------------|-------------|------------------|---------------|-----------|---------------|
| | | | | | | | | |
| Singh et al., 2000 | 60% | 90% | 5.74 | 0.5% | 4.30 | -0.028 | 36 | 0.75 |
| Goel et al., 2012 | 65% | 90% | 6.08 | 0.5% | 4.00 | -0.047 | 22 | 0.66 |
| M 40 kg/m³ - P_f 50% | 80% | 90% | 7.10 | 0.5% | 5.22 | -0.023 | 43 | 0.73 |
| M 40 kg/m³ - P_f 80% | 80% | 90% | 7.10 | 0.5% | 4.87 | -0.028 | 36 | 0.69 |
| M 40 kg/m³ - P_f 90% | 80% | 90% | 7.10 | 0.5% | 4.61 | -0.032 | 31 | 0.65 |

Se evidencia que el valor de σ_6 encontrado experimentalmente en esta investigación es mayor que los valores reportados por Singh y Kaushik (2003) y Goel et al. (2012). Sin embargo las relaciones σ_6/MR son similares.

Para contenidos de fibra metálica del 1% la Tabla 20

muestra los datos extraídos de las referencias (Goel et al., 2012; Huang y Zhao, 1995; Johnston y Zemp, 1991; Jun y Stang, 1998; Singh y Kaushik, 2003; Singh et al., 2005), en donde se puede evidenciar que los órdenes de magnitud de las relaciones σ_6/MR son similares.

Tabla 20. Propiedades de las curvas de fatiga de mezclas con 1.0%

| Autor | Rango evaluado en Relación de esfuerzos (σ/MR) | | MR (MPa) | % Fibra | σ_6 (MPa) | b | -1/b | σ_6/MR |
|--|---|------------|-------------|-------------|------------------|---------------|-----------|---------------|
| | | | | | | | | |
| Singh et al., 2000 | 60% | 90% | 5.74 | 0.5% | 4.30 | -0.028 | 36 | 0.75 |
| Goel et al., 2012 | 65% | 90% | 6.08 | 0.5% | 4.00 | -0.047 | 22 | 0.66 |
| Johnston et al., 1991 | 80% | 90% | 7.03 | 1.0% | 4.90 | -0.032 | 32 | 0.70 |
| Chenkui et al., 1995 | 65% | 90% | 5.99 | 1.0% | 3.80 | -0.050 | 20 | 0.63 |
| Jun & Stang, 1998 | 80% | 95% | 6.73 | 1.0% | 4.50 | -0.022 | 46 | 0.67 |
| Singh et al., 2000 | 60% | 90% | 6.67 | 1.0% | 4.60 | -0.036 | 28 | 0.69 |
| Singh et al., 2005 | 70% | 90% | 7.61 | 1.0% | 5.80 | -0.027 | 38 | 0.76 |
| Singh et al., 2005 | 70% | 90% | 7.50 | 1.0% | 5.60 | -0.031 | 33 | 0.75 |
| Singh et al., 2005 | 70% | 90% | 7.46 | 1.0% | 5.70 | -0.028 | 36 | 0.76 |
| Goel et al., 2012 | 65% | 90% | 7.18 | 1.0% | 5.10 | -0.041 | 25 | 0.71 |
| M 80 kg/m³ - P_f 50% | 80% | 90% | 8.50 | 1.0% | 5.98 | -0.026 | 38 | 0.70 |
| M 80 kg/m³ - P_f 80% | 80% | 90% | 8.50 | 1.0% | 5.79 | -0.028 | 36 | 0.68 |
| M 80 kg/m³ - P_f 90% | 80% | 90% | 8.50 | 1.0% | 5.60 | -0.030 | 33 | 0.66 |



4. Conclusiones

La incorporación de fibras metálicas en los concretos para pavimentos no aumenta la vida de fatiga para contenidos de fibras metálicas de 20 kg/m³ (0.25%), mientras que aumentó un 6% para 40 kg/m³ (0.5%) y 25% para 80 kg/m³ (1%) con respecto al concreto sin fibras en promedio.

Las pendientes de las curvas de fatiga aumentan con la inclusión de fibras metálicas en el concreto, de no ser por el aumento del módulo de rotura del concreto por la inclusión de fibras metálicas, la vida a fatiga no tendría mejoras con respecto a la mezcla control.

Los coeficientes de variación de los datos obtenidos en los ensayos de fatiga son del 100% en promedio, por eso se destaca la importancia de utilizar la distribución de probabilidad Weibull para el procesamiento de los resultados de los ensayos de fatiga, con los cuales en esta investigación se obtuvieron curvas de fatiga con coeficientes de regresión mayores a 0.90. Es importante mencionar que los coeficientes de regresión aumentaron con el aumento de la probabilidad de falla.

5. Referencias

- ACI Committee 360. (2006)**, Design of slabs-on-ground.
- ACI Committee 544. (2009)**, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete (70). ACI Journal Proceedings.
- Batson G., Ball C., Bailey L., Landers E. y Hooks J. (1972)**, Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete beams. ACI Journal Proceedings, 69(11), 673-677.
- Bentur A. y Sidney M. (2007)**, Fibre Reinforced Cementitious Composites (2a Edición.). Canadá: Taylor y Francis.
- Cervo T. C. (2004)**, Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimenta\ccão (Tesis doctoral). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Goel S., Singh S. y Singh P. (2012)**, Fatigue Analysis of Plain and Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal, 109(5), 573-582.
- Grzybowski M. y Meyer C. (1993)**, Damage accumulation in concrete with and without fiber reinforcement. ACI Materials Journal, 90(6), 594-604.
- Hsu T. T. (1981)**, Fatigue of plain concrete. In ACI Journal Proceedings, 78(4), 292-305.
- Huang C. y Zhao G. (1995)**, Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate. Cement and Concrete Composites, 17(3), 199-206.
- Huang Yang (2004)**, Pavement analysis and design. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall, Pearson.
- Johnston C. D. y Zemp R. W. (1991)**, Flexural Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete—Influence of Fiber Content, Aspect Ratio, and Type. ACI materials Journal, 88(4), 375-383.
- Jun Z. y Stang H. (1998)**, Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal, 95(1), 58-67.
- LCPC. (1997)**, Conception et dimensionnement des structures de chaussée (Guide technique.).
- Lee M. K. y Barr B. I. G. (2004)**, An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 26(4), 299-305.
- Li H., Zhang M. y Ou J. (2007)**, Flexural fatigue performance of concrete containing nano-particles for pavement. International Journal of Fatigue, 29(7), 1292-1301.
- Li Z. (2011)**, Advanced concrete technology. Hoboken, United States of America: John Wiley y Sons.
- Lv Y., Cheng H. y Ma Z. (2012)**, Fatigue performances of glass fiber reinforced concrete in flexure. Procedia Engineering, 31(1), 550-556.
- Meda A. y Plizzari G. A. (2004)**, New design approach for steel fiber-reinforced concrete slabs-on-ground based on fracture mechanics. ACI Structural Journal, 101(3), 298-303.
- Mehra P. K. y Monteiro P. J. (2006)**, Concrete: microstructure, properties, and materials (3a edición). Recuperado de <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=554a654dd4c118f1798b458ayassetKey=AS%3A273670184865796%401442259465245>.
- MEPDG A. (2007)**, Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Inc, ERES Consultants Division.
- Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010)**, Reglamento Colombiano de Construcción sísmo resistente. NSR-10. Bogotá D.C.
- Naaman A. y Hammoud H. (1998)**, Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete. Cement and Concrete Composites, 20(5), 353-363.
- Oh B. H. (1991)**, Fatigue life distributions of concrete for various stress levels. ACI Materials Journal, 88(2), 122-128.
- Packard R. G. (1984)**, Thickness design for concrete highway and street pavements. Recuperado de <https://ceprofs.civil.tamu.edu/dzollinger/CVEN-637-Fall%202004/EB109.PDF>.
- Papagiannakis A. y Masad E. A. (2008)**, Pavement design and materials. Hoboken, United States of America: John Wiley y Sons
- Reyes F. A. (2003)**, Diseño racional de pavimentos (1a edición.). Bogotá, Colombia: CEJA Centro editorial Javeriano.
- Shi X., Fwa T. y Tan S. (1993)**, Flexural fatigue strength of plain concrete. ACI Materials Journal, 90(5), 435-440.
- Singh S. y Kaushik S. (2000)**, Flexural fatigue life distributions and failure probability of steel fibrous concrete. ACI Materials Journal, 97(6), 658-667.
- Singh S. y Kaushik S. (2003)**, Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure. Cement and Concrete Composites, 25(7), 779-786.
- Singh S. Mohammadi Y. y Kaushik S. (2005)**, Flexural fatigue analysis of steel fibrous concrete containing mixed fibers. ACI materials journal, 102(6), 438-444.
- Vassilopoulos A. P. (2010)**, Fatigue life prediction of composites and composite structures (CRC Press.). Washington D.C., United States of America: Woodhead publishing limited.