

Incorporación De Fibras De Aramida En La Mezcla De Concreto Para Pavimento

Incorporation Of Aramid Fibers In The Concrete Mix For Pavement

Autores

Erick Franklin Roldán Pinargote ¹, Félix Michael Hernández López ²

¹ Ingeniero Civil. Universidad Técnica de Manabí (UTM). Estudiante de la Maestría en Ingeniería Civil, Mención Vialidad
e-mail: eroldan8661@utm.edu.ec

² Doctor en Ciencias, Investigador del Instituto de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Avenida Universidad s/n, Anáhuac, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México CP-66450
e-mail: fmichaelh@gmail.com

RESUMEN

Hoy en día la durabilidad y sostenibilidad de las carreteras constituyen todo un reto por la importancia que estas significan para el desarrollo económico de cualquier región. Los pavimentos rígidos con adición de fibras constituyen una solución importante en este sentido por su elevada resistencia a la abrasión y a flexión que estas soluciones aportan. Este trabajo consiste en estudiar la formulación de un hormigón con fibras de aramida a base de materiales locales (cemento, grava y arena) y su efecto en el diseño de la losa. Se presenta un estudio donde se refuerza el hormigón mediante varios porcentajes de fibras de aramida Kevlar® 29. Se preparan 36 muestras de concreto, se investiga el aporte en la trabajabilidad y en las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, tracción indirecta y flexión) a lo largo de un intervalo de tiempo de 7 a 28 días usando 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% y 1% de fibras. Los resultados de este estudio destacaron una mejora considerable en las propiedades mecánicas comparadas con el hormigón convencional, pero a determinados porcentajes comienzan a aparecer problemas con la trabajabilidad y una leve caída en la resistencia.

Palabras claves: Fibras de aramidas, pavimento de hormigón, resistencia mecánica.

ABSTRACT

Today the durability and sustainability of highways constitute a challenge due to the importance that these mean for the economic development of any region. Rigid pavements with the addition of fibers are an important solution in this sense due to their high resistance to abrasion and flexion that these solutions provide. This work consists of studying the formulation of a concrete with aramid fibers based on local materials (cement, gravel, and sand) and its effect on the design of the slab. A study is presented where the concrete is reinforced by various percentages of Kevlar® 29 aramid fibers. 36 concrete samples are prepared, the contribution to workability and mechanical properties (compression resistance, indirect traction, and flexion) to over a time interval of 7 to 28 days using 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% and 1% fibers. The results of this study highlighted a considerable improvement in mechanical properties compared to conventional concrete, but at certain percentages problems with workability and a slight drop in strength begin to appear.

Keywords: Aramid fibers, concrete, pavement, mechanical strength

Nota Editorial: Recibido: Noviembre 2023 Aceptado: Diciembre 2023

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos de hormigón hidráulico son estructuras que brindan muy buenas prestaciones durante largos períodos de tiempo, resultando una de las soluciones para tener en cuenta cuando se presentan situaciones donde los niveles de tráfico son elevados y pesados. Estas estructuras presentan un alto costo de construcción que posteriormente puede ser amortizado por los bajos costos de mantenimiento en el número de años para los que son proyectados. Sin embargo, pueden presentar algunos problemas durante el proceso de construcción como es el caso del agrietamiento por retracción a edades tempranas. La combinación de esas pequeñas fisuras con la acción repetida del tráfico y los esfuerzos por gradiente térmico pueden generar deterioros en las losas e incluso ocasionar el fallo de estas. En los últimos años en aras de mejorar el comportamiento de los pavimentos de hormigón hidráulico se ha comenzado a introducir nuevas tecnologías que pretenden mejorar las características resistentes de los hormigones y reducir en mucho de los casos los espesores de losas. Una de estas tecnologías consiste en la introducción de fibras naturales o sintéticas dentro de la mezcla.

El reforzamiento de hormigones con empleo de fibras (FRC, por sus siglas en inglés), tiene una historia de más de cien años desde que las fibras de asbesto se usaron por primera vez en el hormigón hidráulico a principios de 1900 [1]. Desde entonces, las fibras en forma alargada o discreta (cortadas) se han utilizado en elementos estructurales de hormigón como vigas, losas y pavimentos para aumentar su tenacidad, resistencia a la flexión, resistencia al impacto, resistencia a la abrasión, resistencia a la fatiga y para reducir la contracción por secado y agrietamiento térmico [2]. El FRC también permite un mayor espacio entre juntas para pavimentos [3]. Muchos tipos de fibras como fibras metálicas, fibras inorgánicas (es decir, vidrio), fibras sintéticas (orgánicas) a base de acrílico, carbono, polipropileno, polietileno, nailon, aramida, poliéster y fibras naturales como coco, sisal, madera, bambú, yute, caña de azúcar, etc. se han utilizado en hormigón a lo largo de los años.

El hormigón hidráulico reforzado con fibras es un material compuesto hecho con cemento Portland, agregado e incorporación de fibras discontinuas discretas. El objetivo fundamental de las fibras radica en que el hormigón hidráulico simple es un material casi frágil, con una baja resistencia a la tracción y una baja capacidad de deformación. El papel de las fibras discontinuas distribuidas de manera aleatoria es servir de puente a través de las grietas que se desarrollan, lo que proporciona cierta "ductilidad" posterior a la fisuración. Si las fibras son suficientemente fuertes, suficientemente unidas al material y permiten agregar estructuras con este material soporten esfuerzos significativos sobre una capacidad de deformación relativamente grande en la etapa posterior al agrietamiento [4].

Existen varios antecedentes donde se han empleado las fibras de aramidas tanto en hormigones como en morteros de albañilería, entre los que se puede señalar los trabajos realizados por Nie et al [5] y Selbi-Acebedo et al [6] donde demostraron que se mejoran considerablemente la capacidad de absorción de energía, la resistencia a la flexión y se disminuye el agrietamiento al incorporar fibras de poliolenfaramida en la matriz de los morteros de albañilería.

Según plantea el Instituto del Cemento y el Concreto [7] fibras sintéticas se agregan al concreto, generalmente, en dos dosis: porcentaje de bajo volumen (0,1 a 0,3% volumen) o porcentaje de alto volumen (0,4 a 0,8% por volumen). La resistencia del hormigón no se ve afectada, pero las características de control de grietas se modifican cuando se agregan fibras al 0,1% por volumen.

Li et al [8] sobre la base de un estudio experimental con fibras de aramida Kevlar® 29, demostraron que la longitud de la fibra, la relación su peso con respecto a la mezcla y el tamaño en la superficie afectan las propiedades mecánicas estática y dinámicas. En el trabajo se probaron varios porcentajes de fibras en la mezcla (0,1 hasta el 1%) y dos longitudes (12 mm y 24 mm). Todas las adiciones mostraron mejoras considerables en el comportamiento de los hormigones, sin embargo, el tamaño impactó considerablemente en los resultados siendo el de 24 mm el que mejor comportamiento mostró.

En el Ecuador poco se ha podido indagar sobre el uso de estas fibras en pavimentos, es por ello, que el presente trabajo pretende realizar un estudio del comportamiento resistente de hormigones para pavimentos con la incorporación de fibras sintéticas, particularmente las fibras de aramida Kevlar® 29 fabricados en la región de Portoviejo. Primeramente, se realizó un análisis bibliográfico donde se identificaron dos factores fundamentales para su incorporación dentro del hormigón, el tamaño de las fibras y su proporción en la mezcla. Se preparan las mezclas de acuerdo con varios criterios seguido por autores con el fin de lograr una incorporación homogénea de estas fibras, se realiza el mezclado y en cada uno de los casos se realizan los

controles correspondientes al hormigón en estado fresco (asentamiento) y posteriormente se hormigonan los ejemplares dejándolos en un tanque de curado 7, 14 y 28 días. En cada uno de ese intervalo de tiempo se le realizaron varias pruebas de resistencia. Finalmente, los resultados fueron analizados con el fin de establecer los porcentajes recomendados para su uso en pavimentos de hormigón.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES LOCALES

El cemento empleado en el experimento es de alta resistencia fabricado bajo la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 [9], que equivale a la Norma ASTM 1157 [10], es de la marca Chimborazo Tipo HE. Este tipo de cemento está compuesto de clínker de cemento portland, yeso y adiciones de puzolanas naturales. La categoría HE se caracteriza por un desencofrado rápido que produce altas resistencias a edades tempranas, similares a las resistencias del cemento portland Tipo 111 de la Norma ASTM 150 [11]. Se lo llama HE por sus siglas en inglés de "*High Early-Strength*" (alta resistencia temprana), lo que lo hace ideal para fabricar hormigones con mayores resistencias mecánicas, edificar estructuras en zonas de alto riesgo sísmico, y son los que usualmente se emplean en la construcción de pavimentos rígidos en la región.

Los áridos empleados en la mezcla fueron adquiridos en una cantera de la región de Portoviejo llamada Megarock. El árido fino corresponde a una arena conocida como DUNA con un tamaño máximo de 1,18 mm (Tamiz No.16). El árido grueso es una mezcla homogenizada de fracciones de piedra triturada de 1/2" y 1" (50-50). Los resultados de la caracterización gravimétrica y granulométrica se muestran a continuación en la tabla 1 y figura 1, verificando en todos los casos el cumplimiento de las especificaciones para la conformación de hormigones.

Tabla 1: Tabla gravimétrica de los áridos

Propiedad	Árido fino	Árido grueso
Gravedad específica (s/u)	2655	2583
Módulo de finura (%)	2,86	6,43
Absorción (%)	0,79	5,00
Densidad aparente compactada (kg/m ³)	1315	1504

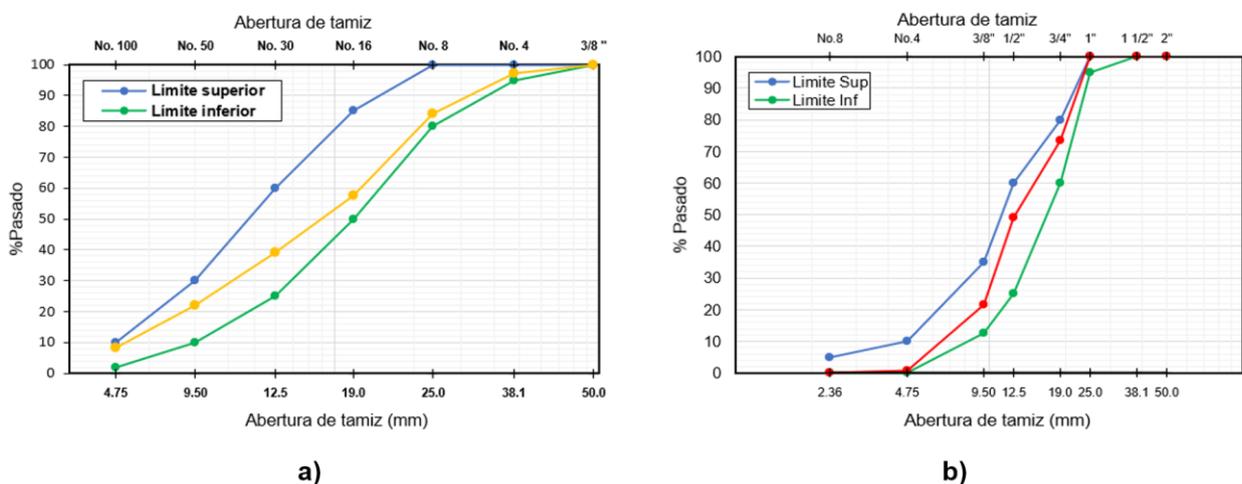


Figura 1: Curvas granulométricas de los áridos empleados en la mezcla, a) árido fino, b) áridos gruesos

La fibra empleada en el estudio es de aramida del tipo Kevlar® 29 y se toma como referencia el tamaño óptimo definido en el trabajo Li et al [8] (24 mm). Esta fibra es importada al Ecuador por la empresa QUIVENSA CIA. LTDA., la cual suministró los datos correspondientes a sus propiedades mecánica (Tabla 2).

Tabla 2: Propiedades de la fibra de aramida Kevlar® 29 empleada en el experimento

Propiedades del material	Valor
Densidad (g/cm ³)	1,44
Resistencia a tracción (MPa)	2920
Resistencia específica (MPa*cm ³ /g)	2030
Módulo de elasticidad (GPa)	70
Deformación (%)	3,6

3. DISEÑO DE LA MEZCLA

Para poder establecer un contraste en el estudio se fabricó un hormigón de referencia sin adición de fibras el cual se comparó con distintos porcentajes de adición. Las fibras se adicionaron siguiendo las recomendaciones del Instituto del Cemento y el Concreto [7], seleccionando un rango que cubre las dos clasificaciones que establece la referencia (0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% y 1%), las mismas se incorporaron dentro de la mezcla en estado seco para lograr su distribución fuera lo más uniforme posible tal como se muestra en la figura 2.

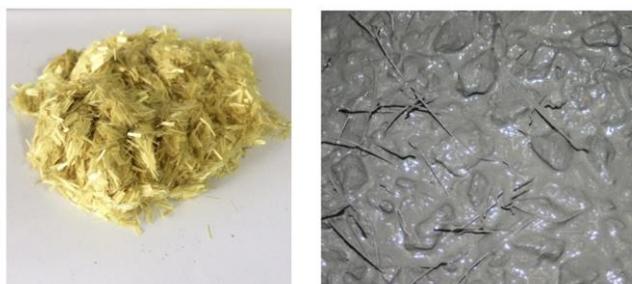


Figura 2: Fibra de Kevlar® 29 con hormigones de diferentes porcentajes de adición

Para el desarrollo del trabajo se fabricaron un total de 36 muestras (24 probetas cilíndricas y 12 probetas prismáticas) lo que requirió aproximadamente de 0,30 m³ de hormigón. Para el diseño de la mezcla se empleó el método formulado por Dreux-Gorisse propuesto por Naga et al. [12], este método tiene la ventaja de dar al esqueleto granular un ordenamiento uniforme. El hormigón se diseñó para alcanzar una resistencia aproximada 300 kg/cm³ para ello, primeramente, se formuló el diseño para un metro cubico de hormigón con una relación agua/cemento de 0,40 y luego se determinó las cantidades para el volumen requerido. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Cantidades de materiales necesarias para la construcción de las probetas

Tipo	Composición	Cemento (kg)	Agua (L)	Árido fino (kg)	Árido grueso (kg)	Fibra de Kevlar (kg)
R	Mezcla de referencia	145,5	58,2	162	364,5	0,0
KF1	Hormigón con 0,2% de fibra de Kevlar	134,7	58,2	162	364,5	0,7
KF2	Hormigón con 0,4% de fibra de Kevlar	126,9	58,2	162	364,5	1,3
KF3	Hormigón con 0,6% de fibra de Kevlar	113,1	58,2	162	364,5	1,9
KF4	Hormigón con 0,8% de fibra de Kevlar	102,3	58,2	162	364,5	2,5
KF5	Hormigón con 1% de fibra de Kevlar	91,5	58,2	162	364,5	3,1

4. DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

Las primeras pruebas realizadas a las mezclas fueron en estado fresco. Primeramente, se estudió la trabajabilidad de las mezclas con distintos porcentajes de fibras, este análisis se realiza tomando como referencia el trabajo de Figueiredo & Ceccato [13] donde plantea que a medida que se incrementan los porcentajes de fibras sintéticas en la mezcla la trabajabilidad tiende a disminuir. Para evaluar esto se realizó el ensayo del “Cono de Abram” de acuerdo a los establecido por la ASTM C143 [14]. La otra prueba realizada en esta etapa fue el ensayo de densidad y el contenido de aire del hormigón, donde en cada preparación se midieron estos factores siguiendo el procedimiento de la ASTM 138 [15] (figura 3).

Para evaluar el efecto de las fibras en la resistencia mecánica del hormigón se realizaron tres ensayos de acuerdo a las normas ASTM [16-18] (compresión uniaxial, tracción indirecta y módulo de rotura). El ensayo a compresión uniaxial y tracción indirecta se realizó con probetas cilíndricas de 150x300 mm, mientras que el de módulo de rotura con probetas prismáticas de 150x150x540 mm. Todas las muestras se fundieron en la relación mencionada en la tabla 3. De cada tipo de muestra se construyeron 3 especímenes compactándolos y enrasándolos adecuadamente, posteriormente, fueron desmoldados pasadas las 24 horas y colocados en un tanque de curado durante 7, 14 y 28 días. En cada una de las edades definidas se realizaron las pruebas registrando el promedio de los resultados en cada caso (figura 4 y figura 5).



Figura 3: Pruebas realizadas a las mezclas en estado fresco



Figura 4: Ensayo de compresión uniaxial y tracción indirecta en los especímenes



Figura 5: Ensayo de resistencia a flexión (módulo de rotura)

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. Pruebas Del Hormigón En Estado Fresco

Los valores de asentamiento del hormigón de referencia y las muestras con distintos porcentajes de fibras de Kevlar® 29 se muestran en la Tabla 4. Los resultados mostraron que cuanto mayor es el contenido de fibra en las muestras, peor es la trabajabilidad, esto a que las fibras comienzan a entrelazarse con el árido grueso limitando su movilidad dentro de la matriz cementicia. Quedando evidenciado que las muestras con un porcentaje mayor al 0,8% resultan muy difíciles de mezclar, esto corrobora lo planteado por Figueiredo & Ceccato [13].

Tabla 4: Valores de asentamiento en la mezcla de referencia y las mezclas con distintos % de fibras

% de fibras en la mezcla	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Asentamiento (mm)	240	180	110	68	40	12

En cuanto a la densidad, es relativamente alta para los hormigones con adición de fibras en comparación con el hormigón de control, lo que explica el papel de relleno de la matriz por parte de las fibras de aramida y su inclusión en los vacíos de la mezcla esto densifica el esqueleto mineral y como resultado la tasa de aire disminuye. Pero se puede observar contrastando la figura 6 y la tabla 4 que a medida que disminuye la trabajabilidad, la relación de porosidad en la estructura de hormigón aumenta lo que provoca una caída en la densidad. Esto se evidencia mejor cuando los porcentajes de fibra superan el 0,4% donde puede observarse como empieza a caer la densidad y a incrementarse el contenido de aire (figura 6). Esto se explica a que las fibras comienzan a entrelazarse formando vacíos dentro de la matriz.

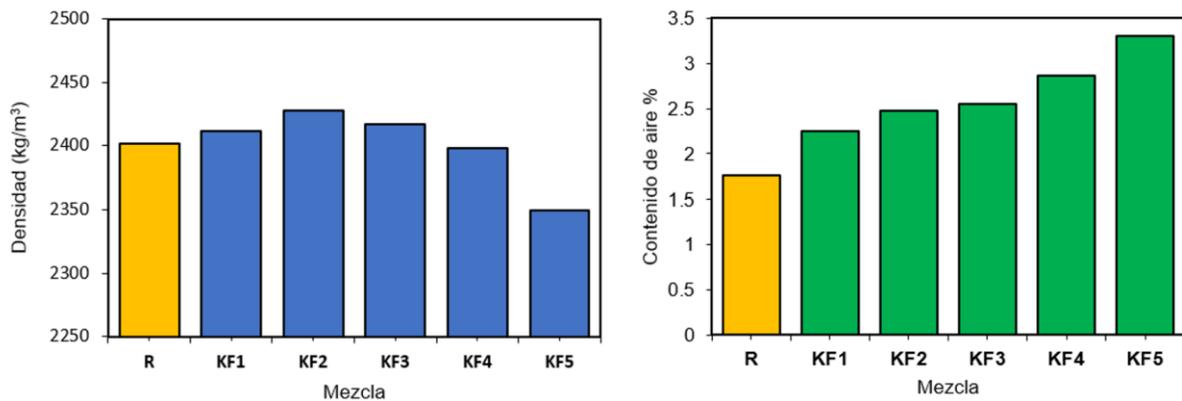


Figura 6: Densidad y contenido de aire para distintos porcentajes de fibras en la mezcla

5.2. Pruebas De Hormigón En Estado Endurecido

La tabla 5 y la figura 7 muestran los resultados de las pruebas realizadas al hormigón convencional (R) y a hormigones con distintos porcentajes de Kevlar® 29. En el análisis para 7, 14 y 28 días se puede observar que las resistencias se incrementan como es de esperar debido al proceso de fraguado del hormigón. En todos los casos se reportó un incremento en la resistencia con respecto a la mezcla patrón, sin embargo, al igual que en las pruebas con el hormigón fresco se pudo constatar que el incremento del porcentaje de fibra influye en el comportamiento del hormigón. En el caso del experimento se analizó la influencia de este incremento comparando los resultados al final del período de fraguado (28 días) como puede observarse en la tabla 5. A medida que se aumenta el porcentaje de fibra se va incrementando el aporte en resistencia tomando como referencia la mezcla patrón llegando a un punto donde esta resistencia alcanza su máximo valor incrementándose en un 31,12% (adición de 0,4% de fibras), luego comienza a decrecer su aporte provocado por el incremento del índice de vacíos detectados durante las pruebas de densidad y contenido de aire. Por lo que puede definirse a la adición de 0,4% como el contenido óptimo de fibras en la mezcla.

Tabla 5: Resultados de los ensayos de resistencia a compresión uniaxial

Muestra	Media (MPa)	desv (MPa)	Incremento de resistencia a los 28 días (%)
R	29,7	1,39	0,00
KF1	33,3	1,56	12,30
KF2	38,9	1,82	31,12
KF3	34,2	1,60	15,33
KF4	32,1	1,50	8,12
KF5	31,0	1,45	4,31

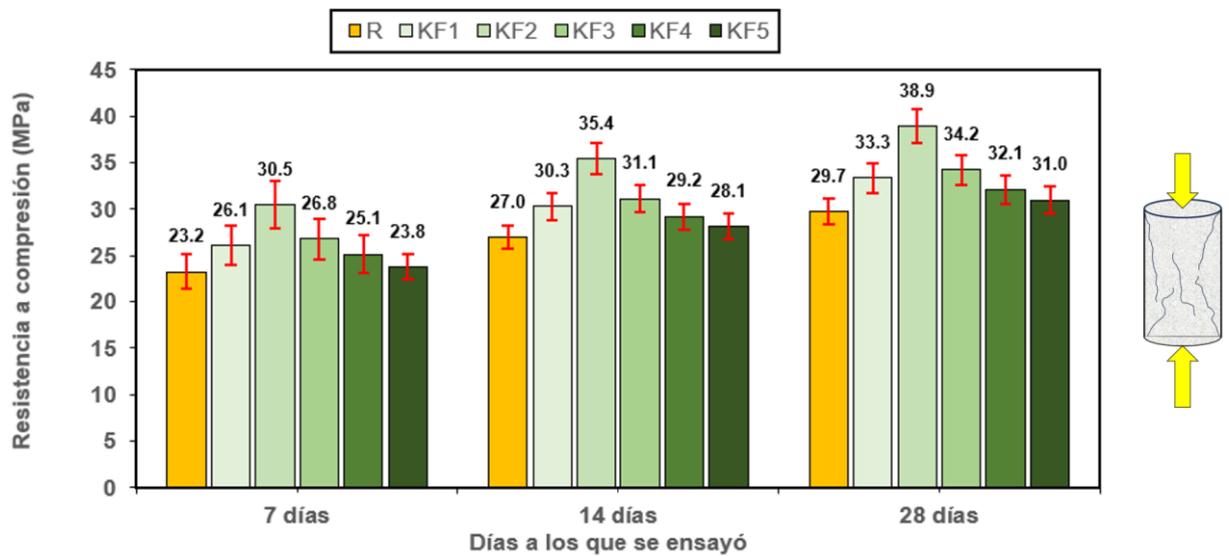


Figura 7: Resultados de los ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días con varios porcentajes de fibra

5.3. Tracción Directa

Las pruebas de resistencia a la tracción indirecta que se muestran en la tabla 6 y figura 8 muestra que las fibras en el hormigón puede mejorar considerablemente su resistencia a tracción. De forma similar que en la prueba anterior se puede notar que el incremento de las fibras en el concreto mejora en todos los casos los resultados comparado con el hormigón convencional a los 28 días. Lo que destaca en este experimento es el aporte porcentual (a los 28 días) comparado con el ensayo de compresión. Los porcentajes incrementan más del 20% en cada caso. Se observa el mismo efecto de la disminución leve de la resistencia por el incremento del porcentaje de fibra en la mezcla (quedando el KF3 como el porcentaje óptimo).

Tabla 6: Resultados de los ensayos de resistencia a tracción indirecta

Muestra	Media (MPa)	desv (MPa)	Incremento de resistencia a los 28 días (%)
R	4,3	0,10	0,00
KF1	5,1	0,12	18,12
KF2	5,3	0,13	23,20
KF3	5,7	0,14	33,11
KF4	5,5	0,13	28,47
KF5	5,2	0,13	21,10

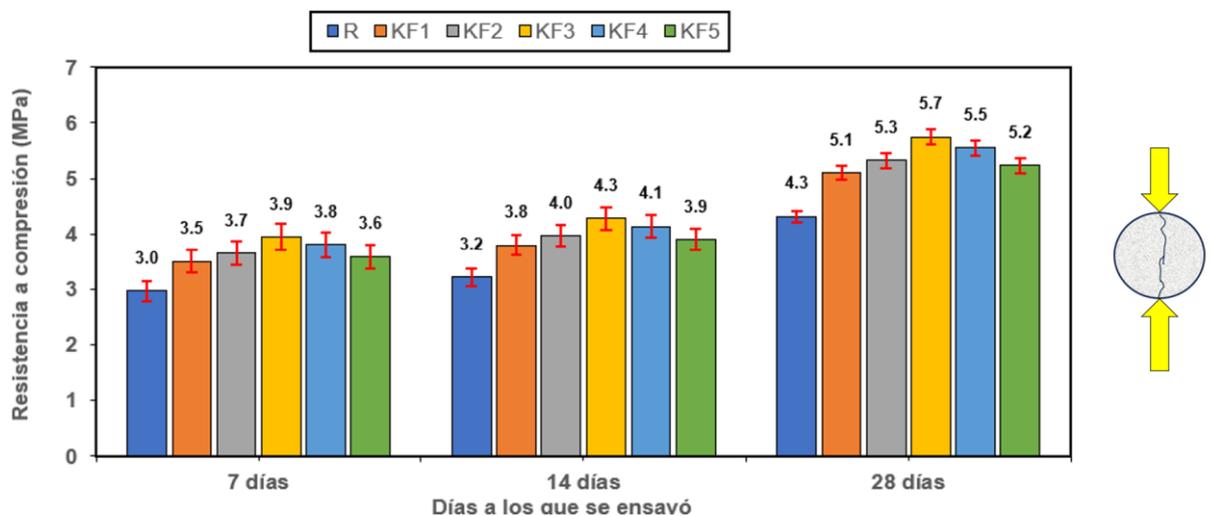


Figura 8: Resultados de los ensayos de tracción indirecta a los 7, 14 y 28 días con varios porcentajes de fibra

5.4. Resistencia A La Flexión

En la figura 9 y en la tabla 7 se muestra cómo se comportó la resistencia a flexión del hormigón con distintos porcentajes de fibras y a diferentes edades. La resistencia a la flexión de las vigas ensayadas se incrementó en todos los casos que se agregó fibras a la mezcla. Mostrando al igual que en el resto de los ensayos realizados que la mezcla con adición de 0,4% (KF2) de fibras es la que ofrece los mayores aportes en resistencia. Estos resultados concuerdan con experimentos realizados con empleo de fibras de aramida por Li Young et al [8].

Tabla 7: Resultados de los ensayos de resistencia a flexión

Muestra	Media (MPa)	desv (MPa)	Incremento de resistencia a los 28 días (%)
R	4,3	0,10	0,00
KF1	5,4	0,13	25,12
KF2	6,2	0,15	43,20
KF3	5,8	0,14	35,33
KF4	5,8	0,14	34,27
KF5	5,7	0,14	31,10

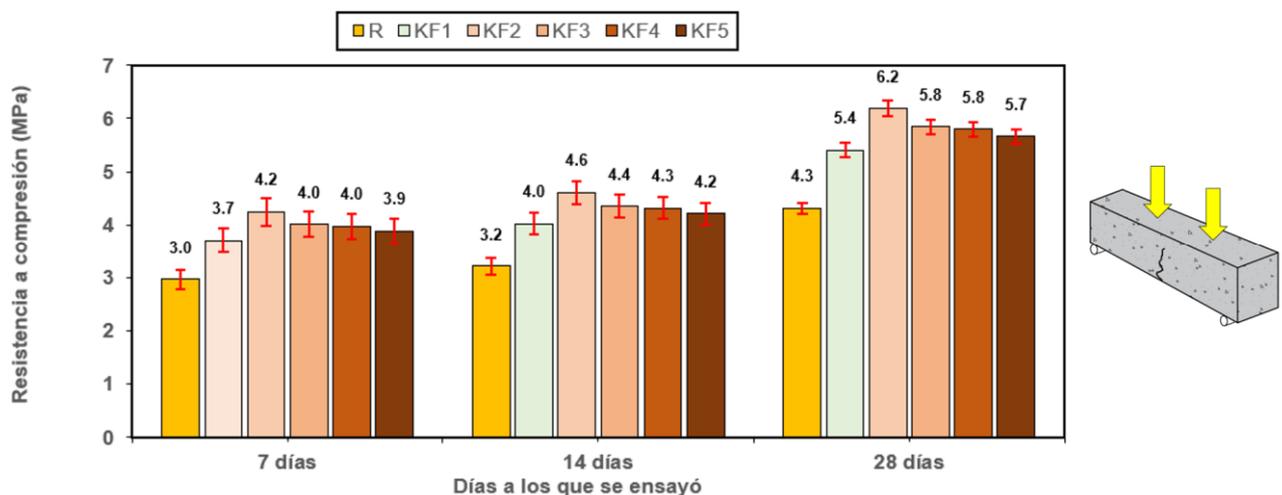


Figura 8: Resultados de los ensayos de flexión a los 7, 14 y 28 días con varios porcentajes de fibra

Finalmente se puede decir que el rol de las fibras en el hormigón es crear un puente a través de las grietas y mejorar la integridad estructural de determinado elemento. Se requiere energía adicional para superar la unión interfacial de la matriz de fibra-cemento mediante procesos de desunión y extracción de fibras. La propagación de grietas en el hormigón se desvía, se amortigua o incluso se detiene, aumentando así la capacidad energética del hormigón [19]. Su efecto dentro de la mezcla se evidencia mucho mejor cuando los elementos se someten a estados directos o indirectos de tracción como es el caso de los últimos experimentos realizados (ensayo brasileño y módulo de rotura) eso quedó claro en los experimentos de tracción indirecta y módulo de rotura.

6. CONCLUSIONES

Una vez que se ha estudiado detenidamente tanto en la parte teórica como en lo práctico cabe destacar que el incremento del porcentaje de fibra influye en el comportamiento del hormigón llegando a tener un óptimo funcionamiento en su resistencia, que ayuda a que las grietas que se ocasionen no provoquen daños fuertes, sino que siga mantenimiento su rigidez.

Se puede observar que en el aporte porcentual del hormigón con la incorporación de la fibra sintética de aramida a los 28 días de curado es fundamental para que la resistencia sea la óptima en cada uno de los ensayos planteados.

Se evidencia que los porcentajes de resistencia con ayuda de la fibra de aramida incrementan las resistencias más que el del 20% en algunos de los casos, sin embargo, incrementa la resistencia a los 28 días de curado, respecto a la mezcla sin aramida, lo mismo a compresión que a tracción, para cualquier porcentaje de aramida.

Se evidenció que la máxima resistencia es del tipo KF2 con un 0,4% de fibra Kevlar, sin embargo, se ha detectado que el porcentaje óptimo no tiene tanta importancia, porque incrementa la resistencia con cualquier porcentaje de aramida incorporada, para realizar la mejora estructural con la ayuda de la fibra aramida se incorporó en el rango determinado de 0,4% a 0,6%, es importante destacar que la incorporación de aramida tiene un valor máximo, que debe estar sobre el 1%, cuando la resistencia a compresión casi tienen el mismo resultado que la mezcla sin tratar.

En los ensayos realizados con la incorporación de más de 0.6% de fibra Kevlar, queda evidenciado que disminuye su resistencia, producto que una vez se incluyan más fibras aumentan los vacíos de aire en su estructura, lo cual produce disminución en la resistencia donde la fibra no aportaría con una resistencia favorable u óptima.

7. AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a la empresa "QUIVENSA CIA. LTDA.", Industria que apoyó la investigación suministrando información sobre las propiedades de las fibras de Kevlar® 29 que ellos comercializan en el Ecuador. De esta manera agradecer a la cantera "MEGAROCK" que brindó los materiales para la elaboración de las probetas ensayadas. Finalmente, un agradecimiento especial al colectivo de profesores e investigadores de la Maestría Académica con Trayectoria Profesional en Ingeniería Civil Mención Vialidad de la Universidad Técnica de Manabí (UTM) por su apoyo incondicional durante el desarrollo de la investigación.

1. S. Mindess and N. Banthia, "Fiber reinforced cementitious composites: current practice and future prospects," *Special Publication*, vol. 144, pp. 417-446, 1994.
2. S. Gupta, V. K. Rao, and J. Sengupta, "Evaluation of polyester fiber reinforced concrete for use in cement concrete pavement works," *Road materials and pavement design*, vol. 9, no. 3, pp. 441-461, 2008.
3. H. Behbahani, B. Nematollahi, and M. Farasatpour, "Steel fiber reinforced concrete: a review," 2011.
4. P. Zhang, C. Wang, Z. Gao, and F. Wang, "A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete," *Journal of Building Engineering*, p. 105975, 2023.
5. L. Nie *et al.*, "Study of aramid and carbon fibers on the tensile properties of early strength cement mortar," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 267, no. 3: IOP Publishing, p. 032009.
6. C. J. Slebi-Acevedo, P. Lastra-Gonzalez, D. Castro-Fresno, and M. Bueno, "An experimental laboratory study of fiber-reinforced asphalt mortars with polyolefin-aramid and polyacrylonitrile fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 248, p. 118622, 2020.
7. CCI, "Fiber Reinforced Concrete," Midrand, South Africa, 2001. [Online]. Available: website of Cement and Concrete Institute
8. Y.-F. Li, H.-F. Wang, J.-Y. Syu, G. K. Ramanathan, and Y.-K. Tsai, "Investigating the Mechanical Performance on Static and Shock Wave Loading of Aramid Fiber-Reinforced Concrete," *Fibers*, vol. 10, no. 10, p. 82, 2022.
9. *Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*, NTE-INEN-2380, Quito, Ecuador, 2011.
10. *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, ASTM-C1157-02, United State, 2017.
11. *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM-C150-07, 2012.
12. C. N. S. Kumar, P. Krishna, and D. R. Kumar, "Effect of fiber and aggregate size on mode-I fracture parameters of high strength concrete," *Advances in concrete construction*, vol. 5, no. 6, p. 613, 2017.
13. A. D. d. Figueiredo and M. R. Ceccato, "Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test," *Materials Research*, vol. 18, pp. 1284-1290, 2015.
14. *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, ASTM-C143, 2015.
15. *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*, ASTM-C138, United States, 2017.
16. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM-C39, United States, 2018.
17. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, ASTM-C78-09, United States, 2010.
18. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM-C496-96, 2017.
19. S. P. Yap, C. H. Bu, U. J. Alengaram, K. H. Mo, and M. Z. Jumaat, "Flexural toughness characteristics of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete," *Materials & Design*, vol. 57, pp. 652-629, 2014.