



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i3.3914>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para
Pavimento Rígido bajo Condiciones de Tránsito en Riobamba***

***Analysis of the modulus of rupture in concrete mixtures with Abacá Fiber for Rigid
Pavement under Traffic Conditions in Riobamba***

***Análise do módulo de rotura em misturas de betão com Fibra Abacá para
Pavimento Rígido em Condições de Tráfego em Riobamba***

Hernán Vladimir Pazmiño-Chiluiza ^I
hvpazmino@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7169-7648>

Lidia Jhoanna Gallardo-Donoso ^{II}
jhoanna.gallardo@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-7126-7665>

César Augusto Mora-Cabrera ^{III}
augusto.mora@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-8008-4116>

Raúl Alexis Salazar-Flores ^{IV}
raulalexis_1@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6483-2613>

Correspondencia: hvpazmino@unach.edu.ec

***Recibido:** 03 de mayo de 2024 ***Aceptado:** 25 de junio de 2024 * **Publicado:** 05 de julio de 2024

- I. Magíster en Ingeniería Vial, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Máster en Prevención y Riesgos Laborales, Máster en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos, Ingeniera Civil, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Magíster en Ingeniería en Vialidad y Transportes, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Magíster en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Sismorresistentes, Docente en la Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

La fibra de abacá, obtenida de las hojas del banano de abacá (*Musa textilis*), es conocida por su alta resistencia a la tracción, durabilidad y capacidad de absorción de agua. Utilizar este material en mezclas de hormigón puede mejorar la ductilidad, incrementar la resistencia a la tracción, flexión, y reducir la probabilidad de fisuras, lo que resulta en un pavimento más resistente y duradero. Este trabajo investiga el uso de fibra de abacá en pavimentos rígidos. Se analiza cómo la inclusión de fibras de abacá en losas de pavimento afecta el módulo de ruptura (MR) y la ductilidad, con el objetivo de controlar grietas y fisuras. Mediante ensayos de laboratorio, se determinará el MR de hormigón simple y con diferentes porcentajes de fibra, buscando una mezcla óptima para la demanda vehicular de Riobamba. El estudio es experimental y descriptivo, con un enfoque cuantitativo y diversos ensayos para caracterizar las propiedades físicas de los materiales. Entre los principales resultados se obtuvo que, la fibra de abacá, cuya calidad depende de varios factores, mostró una densidad de 1.26 g/cm^3 y una absorción del 70.37%. Se dosificaron fibras de abacá para moldes, mejorando la resistencia a la flexión en concreto, destacando un incremento del 20% con fibra longitudinal al 0.50%. En comparación con el concreto simple, la mezcla con fibras mostró mayor ductilidad y menos fallas explosivas, aunque la resistencia a la compresión disminuyó con más fibras. La resistencia a la tracción aumentó hasta un 22.21% con 0.50% de fibra. Los ensayos con la máquina Shimadzu evidenciaron que la adición de fibra cambia la falla a dúctil. El costo de material aumentó un 28%, beneficiando con un incremento del 19.26% en resistencia y mejor comportamiento dúctil.

Palabras clave: Resistencia a la flexión; Módulo de rotura; Fibra de Abacá; *Musa textilis*; Propiedades físicas.

Abstract

Abaca fiber, obtained from the leaves of the abaca banana (*Musa textilis*), is known for its high tensile strength, durability, and water absorption capacity. Using this material in concrete mixtures can improve ductility, increase tensile and flexural strength, and reduce the probability of cracks, resulting in a stronger and more durable pavement. This work investigates the use of abaca fiber in rigid pavements. It is analyzed how the inclusion of abaca fibers in pavement slabs affects the modulus of rupture (MR) and ductility, with the objective of controlling cracks and fissures. Through laboratory tests, the MR of simple concrete and with different percentages of fiber will be determined, seeking

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

an optimal mixture for the vehicular demand of Riobamba. The study is experimental and descriptive, with a quantitative approach and various tests to characterize the physical properties of the materials. Among the main results, it was obtained that the abaca fiber, whose quality depends on several factors, showed a density of 1.26 g/cm³ and an absorption of 70.37%. Abaca fibers were dosed for molds, improving the flexural resistance in concrete, highlighting a 20% increase with longitudinal fiber at 0.50%. Compared to plain concrete, the mixture with fibers showed greater ductility and fewer explosive failures, although compressive strength decreased with more fibers. The tensile strength increased to 22.21% with 0.50% fiber. Tests with the Shimadzu machine showed that the addition of fiber changes the failure to ductile. The material cost increased by 28%, benefiting from a 19.26% increase in resistance and better ductile behavior.

Keywords: Flexural strength; Modulus of rupture; Acabá fiber; Musa textiles; Physical properties.

Resumo

A fibra de abacá, obtida a partir das folhas da bananeira abacá (*Musa textilis*), é conhecida pela sua elevada resistência à tracção, durabilidade e capacidade de absorção de água. A utilização deste material em misturas de betão pode melhorar a ductilidade, aumentar a resistência à tracção e à flexão e reduzir a probabilidade de fissuração, resultando num pavimento mais resistente e durável. Este trabalho investiga a utilização da fibra de abacá em pavimentos rígidos. Analisa-se como a inclusão de fibras de abacá em lajes de pavimento afeta o módulo de rutura (MR) e a ductilidade, com o objetivo de controlar fissuras e fissuras. Através de ensaios laboratoriais será determinado o MR de betão simples e com diferentes percentagens de fibra, procurando uma mistura ótima para a procura veicular de Riobamba. O estudo é experimental e descritivo, com uma abordagem quantitativa e vários ensaios para caracterização das propriedades físicas dos materiais. De entre os principais resultados, obteve-se que a fibra de abacá, cuja qualidade depende de vários fatores, apresentou uma densidade de 1,26 g/cm³ e uma absorção de 70,37%. As fibras de abacá foram doseadas para moldes, melhorando a resistência à flexão do betão, destacando-se um aumento de 20% com a fibra longitudinal a 0,50%. Comparativamente ao betão simples, a mistura com fibras apresentou maior ductilidade e menos falhas explosivas, embora a resistência à compressão tenha diminuído com mais fibras. A resistência à tracção aumentou para 22,21% com 0,50% de fibra. Testes com a máquina

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

Shimadzu mostraram que a adição de fibra altera a falha para dúctil. O custo do material aumentou 28%, beneficiando de um aumento de 19,26% na resistência e de um melhor comportamento dúctil.

Palavras-chave: Resistência à flexão; Módulo de rotura; Fibra de Acabá; Têxteis Musa; Propriedades físicas.

Introducción

La tecnología del hormigón reforzado con fibra está ganando popularidad tanto a nivel internacional como nacional en el sector de la construcción. Esta técnica se emplea en hormigón proyectado para túneles y taludes, y en hormigón prefabricado para suelos industriales (Vargas & Yataco, 2020). No obstante, Vidaud et al. (2015) señalan que el uso de fibras en la construcción no es una innovación reciente. Desde tiempos antiguos, se han utilizado fibras naturales como hilo, paja y pelo de animales, como el de caballo, para añadirlas al mortero y al adobe, mejorando así el control del agrietamiento y aumentando la resistencia a la tracción. A principios del siglo XX, se incorporaron fibras de asbesto a la matriz cementicia, aunque posteriormente se descubrió que eran perjudiciales para la salud humana. Hoy en día, numerosos estudios avalan el uso de fibras en el concreto para mejorar sus propiedades de flexión, ductilidad y tenacidad, y controlar la formación de grietas.

Un pavimento de hormigón es denominado "rígido" debido a que las losas de hormigón absorben la mayor parte de los esfuerzos generados por el tráfico vehicular, transmitiéndolos a las capas inferiores y finalmente a la subrasante con menor intensidad (Castro-Vásquez et al., 2020). Vega (2019) describe un pavimento rígido como una losa de concreto hidráulico apoyada directamente sobre el suelo natural o una sub-base de materiales seleccionados y compactados. La repetición del tráfico vehicular provoca grietas y fisuras debido a la baja resistencia a la tracción del concreto. Tradicionalmente, se colocan mallas de acero corrugado para solucionar este problema, pero esto resulta costoso debido al precio del acero y la extensión de las vías. Por ello, se han estudiado y adoptado fibras de acero, sintéticas y naturales para mejorar la resistencia a la flexión del pavimento, asegurando que cumpla con el nivel de servicio durante su diseño (Vargas & Yataco, 2020). El concreto hidráulico, compuesto de agua, cemento, arena y grava, se endurece al contacto con el aire, siendo utilizado por su durabilidad y resistencia a la compresión en diversas construcciones (Holcim, 2022). Los pavimentos de concreto hidráulico reforzados con fibras incorporan fibras sintéticas o

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo Condiciones de Tránsito en Riobamba

metálicas, mejorando las propiedades mecánicas del concreto y controlando mejor la formación de fisuras (Vargas & Yataco, 2020).

Investigaciones previas han mostrado que la adición de fibras de cabuya, acero y sintéticas incrementa la resistencia del módulo de ruptura, pero hasta ahora no se ha estudiado la fibra de abacá. Esta fibra, que crece principalmente en Ecuador, Costa Rica y Filipinas, tiene un alto valor comercial y se utiliza principalmente para fabricar cuerdas, vestimentas, materiales filtrantes y bolsas de té (TerranovaPapers, 2022). La fibra de abacá está formada por células largas y delgadas que presentan alta resistencia. Benavides (2017) indica que el esfuerzo a la tracción de las fibras de abacá varía entre 775 y 1261 MPa, superando al esfuerzo de tracción del bambú angustifolia (200-300 MPa) y del acero (340 MPa).

En relación al uso de fibras para el reforzamiento del hormigón, Montalvo (2015) comparó losas de hormigón con fibras de acero y tradicionales, recomendando un 0.25 a 2% de fibra de acero para mantener la trabajabilidad, basándose en el ensayo japonés JSCE SF-4/22. Concluyó que las fibras de acero mejoran la flexión y reducen los espesores de las losas hasta en 11 cm, ahorrando un 13% en costos. Herrera y Quispe (2019) ensayaron vigas de hormigón con 0.1% de fibra de agave, logrando aumentar la resistencia a la compresión de 280 kg/cm² a 345.50 kg/cm². Briseño (2016) añadió 1.5% de fibra de cabuya a vigas de hormigón, encontrando que las fibras dispersas mejoraban la flexión hasta 33.04 kg/cm² y generaban una falla más dúctil. Estrella (2016) determinó que fibras de coco y cabuya en concreto mejoran la ductilidad y aumentan la resistencia en un 93% en comparación con hormigón simple. Rivera y Sosa (2010) mostraron que al añadir 1.5 kg/m³ de fibra, el módulo de rotura del hormigón incrementa un 9.52%, mejorando las propiedades mecánicas.

El tránsito periférico de diversas ciudades en el Ecuador (Flores, 2021), incluida la ciudad de Riobamba ha incrementado significativamente en los últimos años. El estudio “Análisis del crecimiento urbano no planificado y su incidencia en los problemas de vialidad y tránsito de la ciudad de Riobamba” muestra que el aumento de la población y de la demanda vehicular se refleja en el rápido deterioro de las vías principales de la ciudad, lo que conlleva altos costos de mantenimiento en periodos muy cortos (Mora, 2017).

La justificación de este trabajo se centra en el uso de la fibra de abacá para pavimentos rígidos. Dado que el esfuerzo de tracción del abacá es superior al del acero, resulta factible investigar cómo afecta la inclusión de fibras de abacá como refuerzo en losas de pavimento rígido. Si se demuestra un

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo Condiciones de Tránsito en Riobamba

aumento en el módulo de ruptura (MR) y la ductilidad, se podría controlar la formación de grietas y fisuras en el pavimento. Este estudio propone utilizar la fibra de abacá en losas para pavimentos rígidos, determinando el módulo de ruptura de un hormigón simple y otro con adición de fibras de abacá en diferentes porcentajes mediante ensayos de laboratorio, para establecer una mezcla óptima, considerando la demanda vehicular de la ciudad de Riobamba.

Metodología

El diseño de la investigación es experimental y descriptivo. Es experimental porque los resultados se obtuvieron a través de ensayos en laboratorio, en lugar de recolección de datos bibliográficos. Se manipuló la proporción de fibra (variable independiente) y se midió el módulo de rotura (variable dependiente) para analizar su efecto. Además, el diseño descriptivo permitió representar el comportamiento del módulo de rotura del concreto con fibras de abacá en comparación con el concreto sin fibras, específico para losas de pavimento rígido.

La investigación se clasifica como exploratoria y explicativa. Es exploratoria porque se enfoca en un tipo de fibra no previamente estudiado para modificar el hormigón en losas de pavimento rígido, buscando obtener resultados sobre su efecto. Además, es explicativa porque se basa en un diseño experimental donde se manipulan en laboratorio tanto la variable dependiente (Módulo de rotura) como la variable independiente (Proporción de fibra) para analizar su relación. El nivel de la investigación es descriptivo, con el objetivo de detallar el comportamiento a flexión de una viga de concreto para losas de pavimento rígido con y sin la adición de fibras de abacá, hasta determinar un porcentaje óptimo. Esta descripción precisa busca evaluar si los resultados son viables para su aplicación en proyectos reales de Ingeniería Civil.

El enfoque es de tipo cuantitativo. El método cuantitativo consistió en procesar y tabular los resultados del módulo de rotura (MR) obtenidos en laboratorio, permitiendo así analizar el comportamiento del hormigón con y sin adición de fibra. Para esto se utilizaron las normas NTE INEN – 2554 del Instituto Ecuatoriano de Normalización (2011) y la Norma ASTM C29 – 02 de la American Society for Testing and Materials (1997).

La población del estudio incluye materiales compuestos utilizados para reforzar losas de concreto para pavimento rígido disponibles en el entorno del proyecto. La muestra consistió en un concreto simple para pavimento rígido reforzado con fibras de abacá. Se realizaron un total de 61 ensayos,

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo Condiciones de Tránsito en Riobamba

distribuidos en 21 cilindros y 40 vigas de material compuesto, para determinar el módulo de rotura (MR).

Procedimientos

En esta investigación se realizaron diversos ensayos para caracterizar las propiedades físicas de los materiales utilizados. Para la fibra de abacá, se evaluaron la densidad específica, densidad lineal y el porcentaje de absorción. En cuanto a los agregados finos y gruesos, se llevaron a cabo pruebas de granulometría, peso unitario suelto y compactado, contenido de humedad, masa unitaria compactada de la mezcla, densidad real y capacidad de absorción, abrasión, impurezas orgánicas mediante colorimetría, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, y la determinación de la cantidad de material que pasa por el tamiz de 75 μm mediante lavado. Para el cemento, se determinó la densidad real. Además, se realizaron ensayos a flexión en vigas con cargas en los tercios, ensayos a compresión y ensayos a tracción por compresión diametral.

Procesamiento y Análisis

La investigación se desarrolló a través de ensayos en laboratorio con el objetivo de determinar la resistencia a la flexión de un pavimento rígido con la adición de fibras de abacá. Se inició con la caracterización de las fibras y los agregados para asegurar que los materiales seleccionados estuvieran en condiciones óptimas. Este proceso también permitió determinar una dosificación óptima para alcanzar la resistencia requerida en el proyecto.

Fibras de Abacá: Las fibras de abacá utilizadas fueron obtenidas de pequeños productores en Santo Domingo de los Tsáchilas, específicamente en la vía a Quevedo km 30 y en la vía a Umpe Chico. Las fibras se presentan en atados de aproximadamente 12 cm de diámetro y 2.5 m de largo promedio.

Resultados

Para sustentar esta investigación, se realizaron una serie de ensayos en laboratorio para caracterizar las propiedades físicas de la fibra de abacá y de los agregados. El objetivo fue asegurar que las mezclas de hormigón para losas de pavimentos rígidos cumplieran con las especificaciones normativas, garantizando así la calidad y seguridad en los proyectos de ingeniería. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en laboratorio.

Caracterización de las propiedades físicas de la fibra de abacá

La planta de abacá, también conocida como "Cáñamo de Manila," puede alcanzar hasta 7 metros de altura. Similar a la mata de plátano, se diferencia por no producir frutos comestibles. Lo más destacable del abacá es la fibra extraída de su tallo, muy utilizada en la industria textil (Alonso, 2021). Las fibras de abacá, compuestas por aproximadamente un 77% de celulosa y un 9% de lignina, pueden medir hasta 3 metros, son resistentes mecánicamente y al daño por agua salada. Las mejores fibras son brillantes, finas y de color habano claro (Alcívar et al., 2023). En Ecuador, el abacá es valorado por su alta resistencia y durabilidad en comparación con otras fibras naturales y artificiales (Torres, 2021). Sus usos incluyen la producción de redes de pesca, filtros, papel moneda, bolsas de té, cuerdas y componentes para la industria automotriz (Montes, 2019). El abacá se cultiva en climas húmedos-tropicales, con temperaturas entre 22 y 28 °C, requiriendo humedad y luz solar. La planta madura en 18-24 meses y puede cosecharse cada 3 meses (Chang & Montero, 2015). La calidad de las fibras varía desde la exterior, de menor calidad, hasta la interior, de mayor calidad, con un color completamente blanco (Torres, 2021). En Ecuador, la producción de abacá se concentra en Santo Domingo (80%), Esmeraldas (10%) y Los Ríos (10%) (Calderón & Ortega, 2020).

Las propiedades que tendrá la fibra de abacá dependerán principalmente de la madurez que tenga la misma, el lugar donde se cultiva, su método de extracción y la calidad de esta, los valores que se obtuvieron en la presente investigación fueron con base en los ensayos, a la disponibilidad de los equipos, otros resultados fueron tomados de investigaciones enfocadas en las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de abacá.

Figura 1: Fibras de abacá



Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
 Condiciones de Tránsito en Riobamba

Tabla 1: Caracterización de las propiedades físicas de la fibra de abacá

	N° de muestras	Resultado promedio	Fórmula Utilizada
Densidad de la fibra de abacá	5	1.26 g/cm ³	$Pf = \frac{D * PI}{D + H - (W + H)}$
Densidad lineal de la fibra de abacá	5	57.39 g/km ³	$= \frac{\text{Peso (g)}}{\text{Longitud (km)}}$
Porcentaje de absorción de agua de la fibra de abacá	8	70.37 % de absorción	$= \frac{\text{Peso SSS} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100$

Caracterización de las propiedades del cemento

Tabla 2: Caracterización de las propiedades del cemento

N° de Ensayo	1	2	3
Masa del cemento (g)	64	64	64
Lectura inicial (ml o cm ³)	0	0	0
Lectura final (ml o cm ³)	22	22.1	21.9
Volumen Desalojado (ml o cm ³)	22.00	22.10	21.90
(g/cm ³)	2.91	2.90	2.92
Densidad promedio del cemento (g/cm ³)	2.91		
Peso específico relativo del cemento (PERC)	2.91	2.90	2.92
Peso específico relativo promedio del cemento (PERc)	2.91		

Conteo Vehicular y TPDA

Número de ejes equivalentes

El cálculo del número de ejes equivalentes es un dato indispensable al momento de realizar el diseño del espesor de la losa y para poder valorar la resistencia a la flexión (MR) que necesita nuestro pavimento rígido, se presenta los resultados del cálculo del número de ejes equivalentes considerando el tránsito de la Av. Pedro Vicente y Av. Monseñor Leónidas Proaño, en el sector denominado “Media Luna”. El valor del número de ejes equivalentes calculado es de 97 607 439, este valor se encuentra

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo Condiciones de Tránsito en Riobamba

dentro de una categoría de tráfico T6 que es de gran flujo vehicular y le corresponde un valor de MR de 4.5 MPa para poder resistir la demanda vehicular de ese tipo de vía.

Diseño del espesor de la losa para pavimento rígido

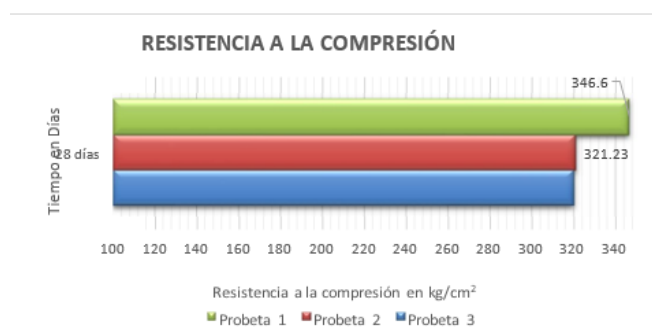
Un parámetro de diseño corresponde al espesor de la losa, esto se puede observar en las normas propuestas por la Asociación Americana de funcionarios Estatales de Carreteras y Transporte (AASHTO, 1993), el procedimiento consiste en colocar un espesor de losa supuesto, se realiza el cálculo de ejes equivalentes (W_{18}) y se verifica que la ecuación quede en equilibrio, caso contrario se deberá colocar otro espesor hasta que se genere un equilibrio (Arroyo, 2010).

Con el método AASHTO-93 después de los cálculos respectivos se determinó un espesor de 32 cm, por otro lado, el método INVIAS un espesor de 26 cm existiendo una diferencia de 6 cm entre estos dos métodos, esto se debe a que la ecuación propuesta por la AASHTO tiene varios años de desactualización, lo que provoca que el espesor de la losa sea mayor, por otro lado, el manual del INVIAS está más actualizado y se han llevado a cabo varios ensayos para poder generar las tablas donde se expresan los espesores acorde al nivel de tráfico, características del pavimento y tipos de suelos que se asemejan a nuestro medio y es por ello que los espesores son menores para generar economía y serviciabilidad.

Resistencia a la compresión

Para poder analizar la incidencia de la fibra en la resistencia a la compresión, se tomaron a los cilindros al 0% de fibra como el valor del 100% de la resistencia para luego compararlas con los cilindros al 0.25 y 0.50% de fibra con base al volumen.

Figura 2: Resistencia a la compresión a los 28 días con base en la dosificación reajustada



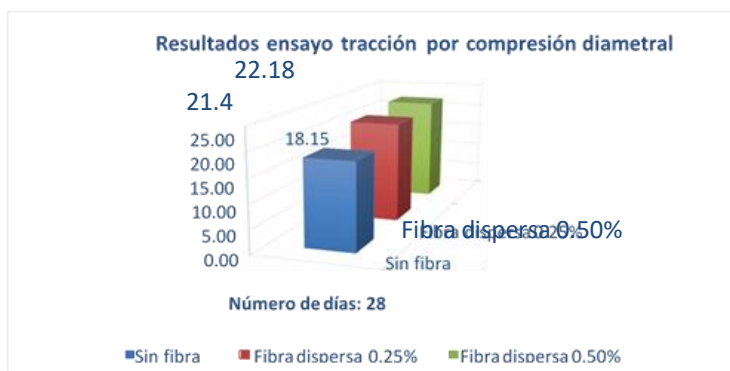
Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
 Condiciones de Tránsito en Riobamba

Como se puede observar en la Figura 2, luego de modificar la dosificación por el método de la densidad óptima, ya se llegó a la resistencia esperada de diseño de $f'c=320\text{kg/cm}^2$ para cumplir con el módulo de rotura requerido de 45 kg/cm^2 , por otro lado, cabe mencionar que no se realizó muestras con fibra dispersa con la dosificación modificada, ya que se conoce que la fibra reduce la resistencia a la compresión.

Resistencia a la tracción indirecta

En la Figura 3 se puede observar la resistencia a la tracción por compresión diametral cuando se coloca diferentes porcentajes de fibra de abacá, cabe recordar que para cada muestra se realizó 3 cilindros y se tomó la resistencia promedio.

Figura 3: Resultados ensayo tracción por compresión diametral



Resistencia a la tracción por compresión diametral 28 días

En la Tabla 3 se puede observar un incremento en la resistencia a la tracción. Hasta en un 22.21% con la adición del 0.50% de fibra de abacá en el concreto simple. Esto se debe a que las fibras de abacá presentan una elevada resistencia a la tracción y por ende al colocarlo en el concreto como una mezcla monolítica se refleja un incremento.

Tabla 3: Resistencia a la tracción por compresión diametral 28 días

fibra	fibra 0.25%	fibra 0.50%
0%		

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
 Condiciones de Tránsito en Riobamba

Resistencia(kg/cm²)	18.15	21.14	22.18
%	100	116.51	122.21

Resistencia a la flexión (Módulo de rotura)

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos del módulo de rotura con la dosificación modificada, con la cual se logró llegar a 45.10 kg/cm² a los 28 días, cumpliendo así con la resistencia de diseño, con la colocación de fibra de abacá ubicada longitudinalmente se obtuvo una resistencia de 46.08 kg/cm² igual a un incremento del 2.19% reduciéndose bastante en comparación con la dosificación anterior que fue de 19.26% de incremento, esto se debe a que el acelerante provocó un debilitamiento y descomposición en la fibra de abacá. Previo al uso del acelerante se investigó en la ficha técnica que el acelerante sika-3 posee un pH de 3 a 5 que se encuentra por debajo del neutro, por lo que difícilmente incrementa el pH del concreto que normalmente es de 12 a 13 (altamente alcalino), y para controlar esto se curó la fibra con parafina en las dos dosificaciones, así que se descarta el debilitamiento de la fibra por la alta alcalinidad de la mezcla, lo más probable es que algún agente químico que presenta el acelerante haya dañado a la fibra, en esta investigación no se determinó por qué el acelerante daña a la fibra, ya que es un tema muy extenso y está más enfocado en el área química y requiere de otro tipo de ensayos.

Tabla 4: Resistencia a la tracción por compresión diametral 28 días

Descripción	Numero de muestra	Tiempo	Módulo de rotura		Resistencia promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar (%)	Coeficiente de Variación (%)	Incremento de resistencia con respecto a la muestra de control
			Resistencia a la flexión (kg/cm ²)	Resistencia mayor (kg/cm ²)				
Fibra 0% - Muestra de control	1	7	35.95	35.95	35.56	0.55	1.55	
	2		35.17					
	3	14	42.99	43.30	43.15	0.22	0.51	
	4	43.30						

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
 Condiciones de Tránsito en Riobamba

	5		45.10					
	6	28	45.03	45.10	44.82	0.43	0.95	
	7		44.33					
Fibra	1		45.88					
longitudin	2	28	46.08	46.08	45.88	0.21	0.46	2.19
al 0.50%	3		45.66					

Se puede notar en la primera dosificación que la resistencia a los 7 días se encuentra alrededor de un 65% con respecto a la resistencia de una muestra a los 28 días como se muestra en Tabla 5 sabiendo que la norma ecuatoriana vial establece que para que una vía pueda ser habilitada, necesita haber cumplido el 80% de su resistencia de diseño, y dado que la vía diseñada es de gran importancia para el flujo de vehículos de Chimborazo y Tungurahua hacia la región costa, se realizó un reajuste en la dosificación y se logró llegar en 7 días a un 79.72% de la resistencia de diseño con el uso del acelerante Sika 3 como se muestra en Tabla 6, por otro lado, con la primera dosificación no se logró llegar a los 45 kg/cm² de la resistencia de diseño y con la dosificación modificada se logró alcanzar un módulo de rotura de 45.10 kg/cm².

Resistencia del módulo de rotura en función del tiempo

Tabla 5: Resistencia a la tracción por compresión diametral 28 días

Descripción	(Tiempo)	(Resistencia)	Resistencia vs Tiempo
	Número de días	Módulo de rotura (kg/cm ²)	
0% - Control	7	20.69	64.60%
0% - Control	28	32.03	100%
0.25% - Dispersa	7	21.52	65.93%
0.25% - Dispersa	28	32.64	100%
0.25% - Longitudinal	7	22.00	63.53%
0.25% - Longitudinal	28	34.63	100%
0.5% - Dispersa	7	23.26	66.31%
0.5% - Dispersa	28	35.08	100%

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
 Condiciones de Tránsito en Riobamba

0.5%- Longitudinal	7	23.85	62.24%
0.5%- Longitudinal	28	38.20	100%

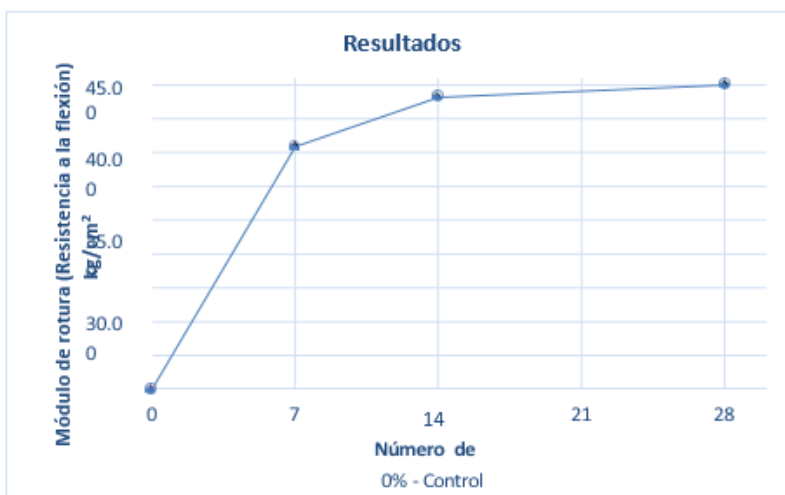
Resistencia del módulo de rotura en función del tiempo (Dosificación modificada)

Tabla 6: Resistencia a la tracción por compresión diametral 28 días

Descripción	(Tiempo) Número de días	(Resistencia)	
		Módulo de rotura (kg/cm ²)	Resistencia vs Tiempo
0% - Control	7	35.95	79.72
0% - Control	14	43.30	96.02
0% - Control	28	45.10	100.00
0.5% - Longitudinal	28	46.08	100.00

En la Figura 4 se puede observar una gráfica de resistencia a la flexión en función del tiempo para vigas de concreto simple sin adición de fibras de abacá, misma que a los 7 días presenta aproximadamente el 80% con respecto a la resistencia de los 28 días, a los 14 días un 96% y a los 28 días el 100%, esto se debe al uso del acelerante Sika-3 que incrementa la resistencia inicial.

Figura 4: Resultados del módulo de rotura a los 7, 14 y 28 días con acelerante Sika-3



Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

En la Figura 5 se muestra la comparativa del comportamiento de las vigas con fibra longitudinal con la primera dosificación vs. las vigas con fibra longitudinal con la dosificación reajustada con acelerante, si vemos la línea verde corresponde a la primera dosificación donde no se ocupó acelerante y se nota claramente el comportamiento dúctil que presenta la fibra ya que al no ocupar acelerante no se debilitó y pudo resistir mucho mejor las cargas aplicadas y esta nunca llegó a cero, ya que la fibra nunca se partió en 2 y mantuvo unida a la viga a pesar de fallar y su deformación seguía aumentando, por otra parte, si analizamos la línea roja vemos que su resistencia es mayor y tiene un poco más de rigidez debido a que la dosificación es más resistente, pero el comportamiento y pendiente es similar, pero la mayor diferencia es en el comportamiento luego de la fractura del hormigón, ya que la fibra al estar en contacto con el acelerante se debilitó y ya no tuvo la capacidad de soportar carga y se rompió rápidamente, y la carga cayó a cero al llegar a una deformación de 2.19 mm, con esto se puede concluir que la adición de acelerantes en la matriz perjudica la durabilidad de la fibra y por ende afecta a su resistencia final y no es recomendable su aplicación en la mezcla con fibras naturales.

Figura 5: Comparativa entre curva Esfuerzo-Deformación de vigas con fibra longitudinal de dosificación antigua vs dosificación reajustada



Diseño de espesor de pavimento con adición de fibra de abacá

Con el método AASHTO-93 el espesor de la losa de pavimento es de 32 cm, por otro lado, se ha demostrado que la fibra de abacá incrementa un 19.26% el módulo de rotura del concreto, a su vez al incorporar en el concreto con adición de fibra el acelerante Sika-3 existe un incremento del 2.19%, por lo tanto, recalculando el espesor del pavimento se obtiene los siguientes valores:

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
 Condiciones de Tránsito en Riobamba

Tabla 7: Espesor de pavimento con adición de fibra de abacá.

	Sin fibra	Con fibra longitudinal al 0.50%	Con fibra longitudinal 0.50% y acelerante Sika-3	Unidades
MR	45	53.67	45.99	kg/cm ²
Espesor losa	32	29	31.61	cm

Análisis económico del hormigón con y sin adición de fibra

Para la comparativa de estos precios se lo realizó para 1m³ y basándose en el porcentaje óptimo de fibra que es del 0.50% con respecto al volumen, a continuación, se presenta una tabla de resumen de los resultados obtenido del cálculo de precios con base en los materiales utilizados en la mezcla de hormigón, los mismos que se pueden ver más a detalle en la Tabla 8.

Tabla 8: Resumen de precios de un hormigón simple vs un hormigón fibro-reforzado

	Hormigón simple	Hormigón simple + fibra	Diferencia
f'c=210 kg/cm²; Precio	\$ 65.8100	\$ 92.2200	\$ 26.4
			1
f'c=320 kg/cm²; Precio	\$ 93.5100	\$ 119.9200	\$ 26.4
			1

Analizando la tabla de resumen de costos entre un hormigón con y sin adición de fibras se puede notar que el incremento es de \$26.41 por metro cúbico, cabe recalcar que también se analizó la primera dosificación con la cual se llegó a un f'c= 210 kg/cm² que equivale a un módulo de rotura de 38 kg/cm², pero con la adición de fibras longitudinales al 0.5%, debido a que este valor cumple para una vía con nivel de tráfico 1.

En la Tabla 9 se presenta el precio de un hormigón simple con y sin adición de fibras, pero agregando un aditivo acelerante para lograr altas resistencias iniciales, la normativa NEVI-12 menciona que en casos especiales en los que el proyecto demande una pronta habilitación debido a su nivel de importancia y sea autorizado por el encargado del proyecto se puede hacer uso de aditivos acelerante,

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo Condiciones de Tránsito en Riobamba

en nuestra investigación debido a que es una vía con nivel de tránsito tipo 4 y de gran importancia se utilizó el aditivo Sika 3 para poder obtener una resistencia inicial alta, a los 7 días se ensayó 2 vigas con lo cual se obtuvo un módulo de rotura de 35 kg/cm^2 que representa el 78% de la resistencia final y la normativa indica que si se llega a un 80% de la resistencia final esa vía puede ser habilitada, con lo cual podemos decir que el acelerante puede ser ocupado si se requiere una pronta habilitación, pero debemos tener en cuenta que el precio por metro cúbico si consideramos acelerante es de \$ 100.10, que en un proyecto de largos tramos de vía, esto va a generar un costo muy elevado del precio final del proyecto, por lo cual no recomendamos el uso de este aditivo a no ser que el proyecto realmente requiera una pronta habilitación, ya que obtendremos la misma resistencia final al cabo de 28 días, cabe mencionar que este tipo de acelerante solo genera esa resistencia alta hasta los 3 días luego de la fundición y luego de eso la resistencia se estabiliza y no presenta cambios de aumento de resistencias finales con el pasar de los días.

Tabla 9: Resumen de precios de un hormigón simple + acelerante vs un hormigón fibro-reforzado + acelerante

	Hormigón simple + aditivo	Hormigón simple + fibra + aditivo	Diferencia
f'c=320 kg/cm²; Precio	\$ 193.6100	\$ 220.0200	\$ 26.41

Conclusiones

- Los agregados gruesos de la mina Cerro Negro y los agregados finos de la mina de Chambo proporcionada por la empresa hormigones moreno cumple satisfactoriamente con parámetros de diseño de una vía de pavimento rígido tales como, granulometría, porcentaje de abrasión, colorimetría, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales.
- Las propiedades físicas de la fibra de abacá dependerán principalmente del lugar donde se cultive, madurez, método de extracción y la calidad de esta, los ensayos que se realizaron dieron como resultado una densidad de 1.26 g/cm^3 , densidad lineal de
- 57.39 g/km , porcentaje de absorción de 70.37%.
- La cantidad de fibras de abacá se dosificó en función del volumen de los moldes (vigas y cilindros), con la finalidad de tener un mejor control de la cantidad que se va a colocar en las diferentes muestras.

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

- La Av. Pedro Vicente y Av. Monseñor Leónidas Proaño, en el sector denominado “Media Luna”, cuenta con un número de ESAL’s de 97’607 439 para los 20 años del periodo de diseño, a su vez es una vía arterial principal y le corresponde un módulo de rotura igual a 45 kg/cm².
- La gráfica de resistencia a la flexión en función del tiempo del concreto presentó la misma tendencia a la gráfica de compresión, ya que a los 7 días se presentó en promedio el 65% de la resistencia que tendrá a los 28 días, por otro lado, cuando se emplea el acelerante Sika 3 la resistencia a los 7 días corresponde al 80% de la resistencia que tendrá a los 28 días.
- En la primera etapa de ensayos las vigas con adición de fibra presentan un incremento en la resistencia a la flexión (MR) en comparación con las vigas de control, para vigas con fibra dispersa al 0.25% se tiene un incremento del 2%, con fibra dispersa al 0.50% se tiene un incremento del 10%, con fibra longitudinal al 0.25% un incremento de 8%, con fibra longitudinal al 0.50% un incremento del 20%, definiendo así como mezcla óptima al concreto simple con adición del 0.50% de fibra por incrementar la resistencia y la ductilidad con respecto a la viga de control y a la viga con fibra dispersa.
- Con la muestra de concreto simple más adición del 0.50% de fibra de abacá ubicada longitudinalmente (primera etapa de ensayos), se obtuvo un incremento del 19.26% con respecto a la muestra de control, en la segunda etapa de ensayo al incorporar acelerante a la muestra se obtuvo un incremento únicamente del 2.19%, esto se debe a que el acelerante provocó un debilitamiento y descomposición en la fibra.
- La resistencia a la compresión con la adición de fibras de abacá en el hormigón disminuye a medida que el porcentaje de fibra aumenta, sin embargo, ayuda a que no se presente una falla explosiva, debido a la adherencia que se genera entre la fibra y el concreto, provocando que el hormigón tenga mayor ductilidad a pesar de tener menores resistencias.
- Al incorporar fibras de abacá, la resistencia a la tracción en un concreto simple incrementa. Teniendo un incremento del 16.51% cuando se coloca 0.25% de fibra de abacá en función del volumen de la muestra, y un incremento del 22.21 % con 0.50% de fibra. Esto se debe a que las fibras de abacá presentan una elevada resistencia a la tracción y por ende al colocarlo en el concreto como una mezcla monolítica se refleja un incremento.

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

- En los ensayos realizados en la maquina universal shimadzu, en donde se puede observar una curva de carga vs. deformación, se pudo evidenciar que el concreto simple presenta una falla frágil y al colocar 0.5 de fibra longitudinalmente provoca un cambio en el comportamiento mismo que genera una falla dúctil, por otro lado, la fibra genera una menor deformabilidad cuando la carga llega al punto máximo.
- El costo en materiales para 1m^3 de hormigón simple con un módulo de rotura de 45 kg/cm^2 es \$ 93.51, y para un hormigón simple con fibra de abacá al 0.50% es de
- \$119.92, con una diferencia de \$26.41 que corresponde al costo de la adición de la fibra curada con parafina, dicho de otra manera, con un incremento del 28 % del costo normal en materiales se puede beneficiar con un incremento del 19.26% en la resistencia, menos probabilidad de fisuras y un comportamiento dúctil.

Referencias

1. Alcívar, T., Durán, J., & Eguez, H. (2023). Análisis del comportamiento mecánico del hormigón convencional empleando fibra de abacá. *Domino de las Ciencias*, 9(3), 1624-1640. <https://doi.org/10.23857/dc.v9i3.3517>
2. Alonso, J. V. (2021). *Manual Control de calidad en productos textiles y afines*. J.V. Alonso Felipe, Madrid. <https://oa.upm.es/38763/>
3. American Society for Testing and Materials [ASTM-C29]. (1997). Método de Ensayo Normalizado para determinar la densidad aparente ("peso unitario") e Índice de Huecos en los Áridos. <https://pdfcoffee.com/astm-c29-peso-unitario-pdf-free.html>
4. American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. (1993). Design of Pavement Structures. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste* (p. 624). <https://habib00ugm.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/05/aashto1993.pdf>
5. Arroyo, N. (2010). *Diseño y conservación de pavimentos rígidos*.
6. Benavides, G. (2017). *Caracterización De Las Propiedades Mecánicas Del Material Híbrido Utilizando Matriz Epóxica Reforzada*. [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/26390>

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

7. Calderón, A., & Ortega, M. (2020). “Análisis De Los Factores Que Intervienen En Las Exportaciones Ecuatorianas De La Subpartida 5305.00.11.00 “Fibras De Abacá En Bruto.” [Tesis de Pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21683/1/T-ESPE-043429.pdf>
8. Castro-Vásquez, M. G. C., Castro-Vásquez, L. A. C., & Castro-Vásquez, P. G. C. (2020). Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el diseño de pavimento rígido. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 5(9), 640-663. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9092701>
9. Chang, A., & Montero, G. (2015). Análisis Del Comportamiento Del Sector Exportador Del Abacá En El Ecuador, Periodo 2000- 2013
10. Estrella, S. (2016). Estudio De Un Material Compuesto A Base De Fibras Naturales De Cabuya Para Mejorar Las Propiedades Mecánicas De Elementos De Concreto Reforzado [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/3072>
11. Flores, E. (2021). Movilidad sostenible en los sectores periféricos: un aporte a las metodologías de planificación espacial y del territorio: el caso Cuenca–Ecuador [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/68913/>
12. Herrera, C., & Quispe, R. (2019). Análisis del comportamiento del concreto hidráulico reforzado con fibras naturales de agave para el diseño de pavimento rígido con el método mecanístico – empírico en la Av. Universitaria de la provincia de Huancavelica-2018 [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional De Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3066>
13. Holcim. (2022). Concretos y morteros. Holcim Colombia. <https://www.holcim.com.co/productos-y-servicios/concretos-y-morteros>
14. Instituto Ecuatoriano de Normalización [NTE-INEN 2554]. (2011). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (utilizando una viga simple con carga en los tercios). <https://archive.org/details/ec.nte.2554.2011>
15. Montalvo, M. E. (2015). “Pavimentos Rígidos Reforzados Con Fibras De Acero Versus Pavimentos Tradicionales” [Pontifica Universidad Católica Del Perú]. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6117>

Análisis del módulo de ruptura en mezclas de hormigón con Fibra de Abacá para Pavimento Rígido bajo
Condiciones de Tránsito en Riobamba

16. Montes, B. I. (2019). Estudio de propiedades de fibra de celulosa reforzadas con nanopartículas 2D y 3D [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/19672/>
17. Mora, G. (2017). Análisis Del Crecimiento Urbano No Planificado Y Su Incidencia En Los Problemas De Vialidad Y Tránsito De La Ciudad De Riobamba, Provincia De Chimborazo. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/1381/1/UNACH-EC-AGR-2016-0002.pdf>
18. Rivera, M., & Sosa, J. (2010). Mejoramiento en las propiedades físico mecánicas y de durabilidad de un pavimento rígido, con la adición de fibras sintéticas estructurales [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/2660>
19. TerranovaPapers. (2022). El Acabá. <http://terravapapers.com/es/el-abaca/>
20. Torres, E. (2021). Producción Y Exportación Del Abacá En El Ecuador.
21. Vargas, G., & Yataco, A. (2020). Efecto De Las Fibras De Acero Y Polipropileno En La Resistencia A La Flexión Del Concreto Para Pavimentos Rígidos efecto De Las Fibras De Acero Y Polipropileno En La Resistencia A La Flexión Del Concreto Para Pavimentos Rígidos [Tesis de Pregrado, Universidad Ricardo Palma]. <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/3678>
22. Vega, L. (2019). Aporte de las fibras Sintéticas y Metálicas en el Módulo de Rotura del Concreto. [Tesis de Pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. <http://hdl.handle.net/10654/32630>
23. Vidaud, I., Frómeta, Z., & Vidaud, E. (2015). Una aproximación a los concretos reforzados con fibras. Construcción y tecnología del concreto, 30, 31. <https://imcyc.com/revistacyt/pdf/julio2015/tecnologia.pdf>