

MEJORAMIENTO DEL MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO HIDRÁULICO
PARA PAVIMENTOS, EMPLEANDO AGREGADOS PÉTREOS LOCALES Y FIBRAS
SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO Y POLIETILENO



IBETH CECILIA CABARCAS TORRES

JORGE LUIS GAMARRA TORRES

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.

2018

MEJORAMIENTO DEL MÓDULO DE ROTURA DEL CONCRETO HIDRÁULICO
PARA PAVIMENTOS, EMPLEANDO AGREGADOS PÉTREOS LOCALES Y FIBRAS
SINTÉTICAS DE POLIPROPILENO Y POLIETILENO

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN GEOTÉCNIA, MATERIALES, VÍAS Y TRÁNSITO
(GEOMAVIT)

EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN MODELACIÓN AMBIENTAL (GIMA)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: VÍAS Y MATERIALES

INVESTIGADORES:

IBETH CECILIA CABARCAS TORRES

JORGE LUIS GAMARRA TORRES

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

DIRECTOR:

DERAMÓN DE JESÚS TORRES ORTEGA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



Agradecimientos

Primero a Dios sobre todas las cosas, luego a nuestras familias por su apoyo incondicional, por su paciencia a lo largo de todo este proceso y por todos los consejos que nos permitieron alcanzar este logro.

Al Ingeniero Ramón de Jesús Torres Ortega como apoyo y guía al momento de aportar su conocimiento y experiencia, los cuales resultaron vitales para cumplir con esta meta.

Al personal de los laboratorios de pavimentos de la Universidad de Cartagena y al Ingeniero Modesto Barrios Fontalvo por su colaboración en el proceso experimental.

A las empresas Sika Colombia, GrupoToxement y Ingueto y Cia Ltda por su colaboración y donación de los materiales que permitieron el desarrollo de la presente investigación.



Contenido

1. Introducción	14
2. Marco de referencia.....	17
2.1. Antecedentes	17
2.2. Estado del arte.....	18
2.3. Marco teórico	20
2.3.1. Fibras.....	20
2.3.1.1. Tipos de fibras.	21
2.3.1.1.1. Microfibras.	21
2.3.1.1.2. Macrofibras.....	21
2.3.1.2. Clasificación de las fibras por material.....	22
2.3.1.2.1. Fibras sintéticas.	23
2.3.1.2.1.1. Fibras sintéticas utilizadas en la investigación.....	24
2.3.1.2.2. Fibras de vidrios.	27
2.3.1.2.3. Fibras naturales.....	27
2.3.1.2.4. Fibras de acero.....	27
2.3.1.3. Hormigón reforzado con fibras.....	28
2.3.1.3.1. Propiedades del hormigón reforzado con fibras en estado endurecido	29
2.3.1.3.2. Normatividad aplicada en los concretos fibroreforzados.	30
2.3.2. Agregados pétreos.....	30
2.3.2.1. Propiedades de los agregados.	31
2.3.2.1.1. Granulometría de los agregados.	31
2.3.2.1.2. Material fino.	32



2.3.2.1.3.	Vacío de los agregados.....	33
2.3.2.1.4.	Resistencia a la abrasión.....	33
2.3.3.	Hormigón.....	33
2.3.3.1.	Características del hormigón.....	34
2.3.3.1.1.	Trabajabilidad.....	35
2.3.3.1.2.	Consistencia.....	35
2.3.3.1.3.	Contenido de aire.....	36
2.3.3.1.4.	Durabilidad.....	36
2.3.3.1.5.	Permeabilidad.....	37
2.3.3.1.6.	Retracción plástica.....	37
2.3.3.1.7.	Resistencia a la compresión.....	38
2.3.3.1.8.	Flexión.....	38
2.3.3.1.9.	Tracción.....	39
2.3.3.1.10.	Módulo de rotura.....	39
2.3.3.1.11.	Elasticidad.....	40
2.3.3.1.12.	Diseño y dosificación.....	41
3.	Objetivo general.....	43
3.1.	Objetivos específicos.....	43
4.	Alcance.....	44
5.	Metodología.....	46
5.1.	Materiales.....	46
5.1.1.	Cemento.....	46
5.1.2.	Agua.....	47
5.1.3.	Agregados.....	47



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



5.1.4.	Aditivo	48
5.1.5.	Fibras.....	49
5.2.	Dosificaciones para fibras en concreto para pavimentos	50
5.3.	Ensayos en los agregados.....	50
5.3.1.	Granulometría	52
5.3.2.	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos	53
5.3.3.	Resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles.....	55
5.3.4.	Densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino.....	56
5.3.5.	Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso.....	57
5.3.6.	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados	59
5.3.7.	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.....	60
5.4.	Diseño de mezcla	61
5.5.	Fabricación de muestras	61
5.5.1.	Elaboración de especímenes	62
5.6.	Ensayos del concreto en estado fresco y curado	63
5.7.	Ensayos del concreto en estado endurecido.....	64
5.7.1.	Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto para pavimentos.	65
5.7.2.	Ensayo de tracción indirecta sobre cilindros de concreto para pavimento. ...	66
5.7.3.	Resistencia a flexión del concreto para pavimentos.	68
6.	Resultados y discusión	71
6.1.	Ensayos en los agregados pétreos locales	71
6.1.1.	Granulometría	71
6.1.2.	Densidad, Densidad relativa y absorción del agregado fino.	74



6.1.3.	Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso.....	75
6.1.4.	Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos	75
6.1.5.	Resistencia a la desgaste por medio de la máquina de los ángeles.	76
6.1.6.	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados 77	
6.1.7.	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.....	77
6.2.	Diseño de mezcla	78
6.2.1.	Asentamiento	78
6.2.2.	Volumen de agua	79
6.2.3.	Relación agua cemento	80
6.2.4.	Contenido de cemento.....	81
6.2.5.	Agregados pétreos.....	81
6.2.5.1.	Análisis granulométrico.....	81
6.2.5.1.1.	Agregado Grueso.....	82
6.2.5.1.2.	Agregado fino.....	84
6.2.5.2.	Características del agregado pétreo	85
6.2.6.	Volumen de agregado grueso.....	86
6.2.7.	Volumen para el agregado fino	87
6.2.8.	Proporciones.....	87
6.2.9.	Ajuste de la cantidad de agua de mezclado debido a la humedad de los agregados	88
6.2.10.	Adicionales en el concreto.	89
6.2.11.	Proporciones finales	90
6.3.	Asentamiento	91
6.4.	Ensayos en el concreto en estado endurecido.	92



6.4.1.	Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto para pavimentos	92
6.4.2.	Ensayo de tracción indirecta sobre cilindros de concreto para pavimento. ...	94
6.4.3.	Resistencia a flexión del concreto para pavimentos.	96
6.5.	Diseño de Pavimento	97
6.5.1.	Localización y caracterización de la vía	98
6.5.2.	Serviciabilidad	98
6.5.3.	Confiabilidad (R)	99
6.5.4.	Desviación estándar (Z_R)	100
6.5.5.	Transferencia de carga (J)	101
6.5.6.	Módulo de elasticidad	101
6.5.7.	Módulo de ruptura.....	102
6.5.8.	Módulo de reacción de la subrasante	102
6.5.9.	Drenaje	103
6.5.10.	Transito	105
6.5.11.	Espesores.....	105
6.6.	Evaluación económica.	107
7.	Conclusiones	110
8.	Recomendaciones.....	112
9.	Bibliografía	113



Lista de ilustraciones.

Ilustración 1. Tensión (MPa) vs deflexión (mm).....	26
Ilustración 2. Diferentes tipos de fibras metálicas.	28
Ilustración 3. Margen de la curva granulométrica del agrado fino.	32
Ilustración 4. Grafica esfuerzo- deformación.....	41
Ilustración 5. Cemento de la marca Cemex de uso general utilizado en fabricación de los especímenes.	47
Ilustración 6. Aditivo supe plastificante utilizado en las muestras adicionadas con fibras.	49
Ilustración 7. Reducción de las muestras del agregado pétreo empleado el método de cuarteo.	52
Ilustración 8. Recipiente de volumen conocido y varilla compactadora que permite hallar densidad bulk.	54
Ilustración 9. Máquina de los Ángeles encontrada en laboratorio de la Universidad de Cartagena.	55
Ilustración 10. Balanza y picnómetro de 500 ml necesarios para la realización del ensayo.	56
Ilustración 11. Balanza y canasta metálica utilizada en la realización del ensayo.	58
Ilustración 12. Agregado pétreo sumergido en agua destilada con el fin de desprender las partículas deleznable.	59
Ilustración 13. Clasificación de partículas de cara fracturada en el laboratorio.	60
Ilustración 14. Ensayo de Slump realizado a la muestra patrón.	63
Ilustración 15. Concreto en estado fresco con adición de fibras y plastificante	64
Ilustración 16. Medición de la resistencia a compresión del cilindro de concreto en la prensa hidráulica.	66
Ilustración 17. Cilindro de concreto en el montaje necesario para el ensayo de tracción indirecta.	67
Ilustración 18. Montaje necesario para la realización del ensayo a flexión con la vigueta flexionada.	68



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



Ilustración 19. Ubicación de la vía campaña a la cual se le aplicara el diseño de pavimento.
..... 98

Ilustración 20. Relación promedio entre los factores del módulo de reacción y el CBR de un
suelo. 103



Lista de Tablas.

Tabla 1. Características mecánicas de las fibras.	23
Tabla 2. Propiedades necesarias para el agregado fino para su utilización en un pavimento.	47
Tabla 3. Características necesarias para el agregado grueso en su utilización en un pavimento.	48
Tabla 4. Principales características físicas de la fibra TUF-STRAND SF.	49
Tabla 5. Numero de especímenes a elaborar dependiendo de las dosificaciones de las fibras.	50
Tabla 6. Ensayos realizados a los agregados con el fin de obtener su calidad.	51
Tabla 7. Granulometría requerida para el agregado fino utilizado según la norma INVIAS.	53
Tabla 8. Granulometría requerida para el agregado grueso utilizado según la norma INVIAS.	53
Tabla 9. Especímenes fundidos para cada diseño de mezcla.	61
Tabla 10. Resultados obtenidos del proceso de tamizado del agregado fino.	71
Tabla 11. Resultados obtenidos del tamizado del agregado grueso.	72
Tabla 12. Datos obtenidos durante la realización del experimento en campo para la arena.	74
Tabla 13. Resultados obtenidos del desarrollo de la metodología planteada para la arena.	74
Tabla 14. Datos obtenidos durante la realización del experimento en campo para la grava.	75
Tabla 15. Resultados obtenidos del desarrollo de la metodología planteada para la grava.	75
Tabla 16. Variables obtenidas en la realización de la prueba de peso bulk y absorción.	76
Tabla 17. Resultados obtenidos en la realización de la prueba de peso bulk y absorción ...	76
Tabla 18. Porcentaje de la resistencia a la gradación del agregado grueso.	76



Tabla 19. Resultados de los porcentajes de arcillas y partículas delesnables de los materiales, tanto para fino como para grueso.	77
Tabla 20. Resultados del porcentaje de cara fracturada del agregado grueso.....	77
Tabla 21. Materiales utilizados en la fabricación del concreto diseñado.....	78
Tabla 22. Valores de asentamiento según tipo de construcción.....	79
Tabla 23. Valores de tamaño máximo nominal según el tipo de construcción.....	79
Tabla 24. Relación entre la resistencia a la compresión y valores de la relación a/c.....	80
Tabla 25. Recomendaciones para relación a/c.	81
Tabla 26. Porcentaje de masa que pasa que se ajustan a las gradaciones mencionadas.	82
Tabla 27. Comparación de las gradaciones 6 y 67 de la norma con la granulometría obtenida en laboratorio.	82
Tabla 28. Porcentaje de masa que pasa requeridas para él fino propuesta por la norma.	84
Tabla 29. Comparación de la gradación de la norma ASTM C33 con la granulometría del agregado fino obtenida en laboratorio.....	84
Tabla 30. Características del agregado fino y grueso necesarias para diseñar el concreto para pavimentos.	86
Tabla 31. Volúmenes de agregado grueso por volumen de concreto.	86
Tabla 32. Volúmenes y pesos de cada uno de los materiales por unidad de volumen de concreto.....	88
Tabla 33. Correcciones del agua de amasado por humedad y absorción del diseño de mezcla.	88
Tabla 34. Volúmenes y pesos de cada uno de los materiales por unidad de volumen de concreto corregidos.	89
Tabla 35. Proporciones de Aditivo para cada tipo de mezcla de concreto adicionada con fibras.....	89
Tabla 36. Proporciones finales del diseño de mezcla CSF para 1 m ³ de concreto.....	90
Tabla 37. Proporciones finales del diseño de mezcla CCF-6KG para 1 m ³ de concreto. ...	90



Tabla 38. Proporciones finales del diseño de mezcla CCF-12KG para 1 m ³ de concreto. .	90
Tabla 39. Proporciones finales del diseño de mezcla CCF-18KG para 1 m ³ de concreto. .	91
Tabla 40. Asentamiento obtenido para cada uno de los concretos. .	91
Tabla 41. Resistencia a la compresión de CSF según varias edades.	92
Tabla 42. Resistencia a la compresión de los concretos adicionados con fibras teniendo como referencia la muestra patrón(concreto sin fibra)	93
Tabla 43. Resultados del ensayo de tracción indirecta en todos los especímenes de los diseños de mezclas.	95
Tabla 44. Resultados del ensayo a flexión para hallar el módulo de rotura de los especímenes.	96
Tabla 45. Nivel de servicialidad dependiendo de la conformidad final de la estructura....	99
Tabla 46. Nivel de confiabilidad dependiendo del tipo de vía diseñar.	99
Tabla 47. Desviación estándar de acuerdo a la confiabilidad escogida para el diseño de pavimento.....	100
Tabla 48. coeficiente de transferencia de carga según el tipo de junta.	101
Tabla 49. Módulo de elasticidad de cada uno de los concretos basado en su resistencia a compresión.	102
Tabla 50. Módulo de rotura de cada uno de los concretos hallados con anterioridad.	102
Tabla 51. Capacidad del drenaje en base al tiempo de remoción del agua supuesto.	104
Tabla 52. Coeficiente de drenaje en base a la calidad del drenaje.....	104
Tabla 53. Variables involucradas en el diseño de la estructura de pavimentos.	105
Tabla 54. Características de los concretos involucrados en el diseño de pavimento.	106
Tabla 55. Análisis de precios unitarios por metro cuadrado para el concreto sin fibras.	107
Tabla 56. Análisis de precios unitarios por metro cuadrado para el concreto con fibras CCF-6KG.	108
Tabla 57. Comparación de costos por metro cuadrado entre CSF y CCF-12KG	109



Resumen

Obtener un concreto para pavimento hidráulico de alta resistencia a la flexión, durable y de bajo costo ha sido un reto para la ingeniería, para lo cual se han buscado tecnologías que le aporten al pavimento estas propiedades; entre estas tecnologías se encuentra el uso de fibras en la mezcla de concreto, en ese orden de ideas, para el desarrollo de la presente investigación se propuso un diseño de mezcla con fibras sintéticas TUF-STRAND SF (estas fueron donadas por la empresa Ingueto y Cia Ltda) con dosificación de 6, 12 y 18 kilogramos por metro cubico, y agregados pétreos de la zona, con el objetivo de obtener una resistencia a la compresión igual o superior a 5000 psi y alta resistencia a la flexión. Para llevar a cabo este objetivo se hicieron todos los ensayos de caracterización a los agregados para comprobar que estos cumplieran con los requisitos de calidad propuestos por la norma INVIAS, para posteriormente realizar el diseño de mezcla basado en las características obtenidas de los agregados y seleccionando una relación agua/cemento de 0,45; una vez se obtuvo el diseño de mezcla se procedió a la fabricación de 30 cilindros (10x20 cm) y 12 viguetas (15x15x55cm), para posteriormente realizar al concreto pruebas en estado fresco (prueba de asentamiento) y en estado endurecido (ensayo a la compresión, flexión y tracción indirecta). Finalmente, se comprobó que el uso de fibras mejoró características en el concreto tales como la resistencia a la flexión en un 10,33%, 22,92% y un 29,96% para las dosificaciones de 6, 12 y 18 kilogramos por metro cubico respectivamente, con respecto a la muestra patrón; para la resistencia a la tracción se mejoró en un 12,41%, 40,22%, 31,27% para las dosificaciones de 6, 12 y 18 kilogramos por metro cubico respectivamente, con respecto a la muestra patrón; y la resistencia a la compresión se redujo hasta un 11,25% para la mayor dosificación (18 kg/m³) con respecto a la muestra patrón. Adicionalmente se hizo un diseño de pavimento hidráulico para el concreto adicionado con fibras y sin fibras para de esta manera realizar un análisis de precios unitarios para evaluar la viabilidad económica del uso de fibras en los pavimentos.



Abstract

Obtaining a concrete for hydraulic pavement of high resistance to bending, durable and low cost has been a challenge for engineering, for which technologies that provide the pavement with these properties have been sought; among these technologies is the use of fibers in the concrete mix, in that order of ideas, for the development of the present research proposed a mix design with synthetic fibers TUF-STRAND SF (these were donate by the company Ingueto y Cia Ltda) with 6, 12 and 18 kilograms per meter cubic, and stone aggregates of the area, with the aim of obtaining a resistance to compression equal to or greater than 5000 psi and high resistance to bending. To carry out this objective, all the characterization tests were done on the aggregates to verify that they complied with the quality requirements proposed by the INVIAS standard, to subsequently make the mix design based on the characteristics obtained from the aggregates and selecting a water / cement ratio of 0.45; Once the mix design was obtained, 30 cylinders (10x20 cm) and 12 joists (15x15x55cm) were manufactured, to subsequently perform the tests in the fresh state (settlement test) and in the hardened state (compression test, flexion and indirect traction). Finally, it was found that the use of fibers improved characteristics in concrete such as the resistance to flexion by 10.33%, 22.92% and 29.96% for the dosages of 6, 12 and 18 kilograms per meter cubic respectively, with respect to the standard sample; for the tensile strength was improved by 12.41%, 40.22%, 31.27% for the dosages of 6, 12 and 18 kilograms per cubic meter respectively, with respect to the standard sample; and the compressive strength was reduced to 11.25% for the highest dosage (18 kg/m³) with respect to the standard sample. Additionally, a hydraulic pavement design was made for the concrete added with fibers and without fibers to perform a unit price analysis to evaluate the economic viability of the use of fibers in the pavements.



Introducción

La ingeniería en Colombia está en constante desarrollo, y esto se ve reflejado en campos como la infraestructura vial que requiere una constante inversión debido al deterioro que sufre por factores como: el exceso de cargas móviles, mala calidad de los materiales, mal diseño y ejecución, entre otros; por lo que se hace necesario la adecuación de las vías y la durabilidad de los pavimentos teniendo presente el factor económico, por esta razón es pertinente el desarrollo de modificaciones en el pavimento que garanticen resultados eficientes y funcionales de acuerdo con las problemáticas viales. Para llevar a cabo este objetivo se tiene en cuenta el uso de materiales innovadores como lo son las fibras sintéticas, las cuales brindan excelentes resultados en términos de tenacidad reduciendo el comportamiento frágil del hormigón e incrementando la resistencia a la fatiga y al impacto generado por las cargas. Sin embargo, el uso de fibras en pavimentos rígidos es un tema incipiente en Colombia y más aún en el entorno de la zona Caribe, por lo que resulta importante un estudio con mayor detalle acerca de las propiedades, dosificaciones y criterios de las fibras de acuerdo con su desempeño en el pavimento. De lo dicho anteriormente y teniendo en cuenta que la adición de fibras puede mejorar el desempeño de un concreto, surge la pregunta: ¿En qué porcentaje se mejorará el módulo de rotura de un concreto de pavimento hidráulico, al adicionarle fibras sintéticas de polietileno y polipropileno, y agregados pétreos locales?

Según estudios en común realizados, al adicionar fibras en la mezcla de concreto se logra reducir las fisuras y el uso de la malla electrosoldada, por lo que supone un correcto funcionamiento del pavimento ya que las fibras reducirían el ancho de la fisura si esta se presenta y permite el adecuado funcionamiento de la estructura para que esta continúe en servicio de forma óptima ya que aumenta su vida útil; lo que traduce una disminución de los espesores y por ende de los costos. Adicionalmente, se sabe que se han adelantado trabajos de investigación afines a esta temática como lo es la resistencia abrasiva del hormigón con diferentes tipos de fibras, variando factores como la relación agua-cemento y demostrando



que los hormigones con alta resistencia a la compresión y a la flexión también tienen alta resistencia a la abrasión; lo que brinda una luz en el campo de esta investigación.

Este tema de investigación resulta pertinente para el campo profesional debido a que es una temática virgen a nivel local, la cual no ha sido desarrollada por falta de asesoría especializada que oriente el uso de fibras sintéticas en los pavimentos rígidos, por lo tanto, se requieren estudios que permitan conocer criterios en cuanto a dosificación y empleo para la medición del desempeño del pavimento cuando sea puesto en servicio. En este caso estas investigaciones son factibles de llevar a cabo para conocer a ciencia cierta la mejora en el comportamiento del pavimento utilizando materiales novedosos como las fibras, y a su vez se conocería como contribuyen al aumento de la vida útil del pavimento y a la disminución de costos por reducción de espesores y mantenimiento.

Los materiales necesarios para llevar a cabo la investigación fueron donados por la empresa Ingueto y Cia Ltda, la cual financió este proyecto; esta investigación tuvo lugar en los laboratorios de la Universidad de Cartagena y en la empresa Barrios Padilla Ingenieros S.A.S. El correcto desarrollo del presente proyecto se compuso de una investigación profunda del estado del arte, lo cual permitió la contextualización acerca de las investigaciones precedentes en el tema, y a su vez permitió aclarar los objetivos del proyecto; una vez culminada esta fase se realizó la caracterización de los agregados en los laboratorios de la Universidad de Cartagena con el objetivo de tener los datos correspondientes para el diseño de mezcla de concreto adicionado con fibras, para posteriormente realizar las diversas amasadas del concreto junto con los ensayos en estado fresco; y en los laboratorios de la empresa Barrios Padilla Ingenieros S.A.S realizar las pruebas del concreto en estado endurecido. Todo esto se hizo con el objetivo de diseñar un pavimento adicionado con fibra y otro sin fibra para verificar en cuanto varían los espesores y verificar si existe un beneficio económico con el uso de fibras sintéticas en el concreto para pavimentos.

El estudio realizado verificó la literatura actual al comprobar los beneficios que trae consigo las fibras en el mejoramiento de ciertas propiedades mecánicas del concreto, tales como el



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



aumento del módulo de rotura, y a su vez se comprobó que el empleo de las dosificaciones correctas de fibras en la mezcla de concreto permite disminuir los espesores. Cabe resaltar que se amplió la literatura al demostrar que para obtener un pavimento económico y durable no solo es necesario agregar fibras a la mezcla, sino que se debe seleccionar una dosificación que no sea excesiva pero que permita el aumento del módulo de rotura, es decir, la disminución de los espesores y por consiguiente del costo.



2. Marco de referencia

2.1. Antecedentes

En Colombia la infraestructura vial no satisface completamente los objetivos para los cuales fue diseñada, por consiguiente, existen problemas de vialidad sumado a lo que esto trae consigo: pérdidas económicas, transporte ineficiente, mantenimiento periódico, entre otros. A pesar de que se hayan tomado medidas por parte del gobierno, esto no es suficiente debido a que la inversión no satisface las necesidades viales y peor aún, el mantenimiento significa deterioro de la vía y por consiguiente mayores costos de inversión. De esto se infiere que los problemas aún existen y pueden empeorar progresivamente, por lo que resulta necesario innovar en el ámbito de las vías, más específicamente en la producción de un pavimento con mayor durabilidad y resistencia que a su vez sea económico y con poco mantenimiento; para esto es necesario realizar una investigación en busca de nuevas tecnologías haciendo uso de materiales innovadores que mejoren el comportamiento del pavimento tales como las fibras.(Rivera & Sosa, 2010)

Las investigaciones con respecto a las fibras son relativamente recientes, en el año 2011 en Serbia se trabajó una investigación sobre la resistencia abrasiva del hormigón clásico y el hormigón microarmado con dos tipos de fibras de polipropileno, variando el factor agua/cemento; en esta se llevó a cabo una prueba acelerada de erosión abrasiva del hormigón permitiendo que el chorro de alta velocidad con una mezcla de agua-arena actuara en la superficie de los especímenes. Se obtuvieron resultados que demuestran que la resistencia abrasiva del hormigón está en función inversa del factor agua-cemento; por lo tanto, los hormigones con alta resistencia a la compresión y la flexión también tienen alta resistencia a la abrasión; y con respecto a los hormigones micro reforzados se demostró que tienen mayor resistencia abrasiva en comparación con una muestra de concreto patrón.(Grdic Et al., 2012)



2.2. Estado del arte

En el 2012 en la Universidad Militar de Nueva Granada se comprobó que mediante el uso de fibras de polipropileno se reducen las pequeñas fisuras por contracción que se desarrollan en el concreto durante las primeras 24 horas. Es considerable el incremento del valor en el esfuerzo residual en las fibras sintéticas con respecto al concreto simple y aun en mayor proporción con respecto a las fibras metálicas; por lo que se puede establecer que al adicionar fibras al concreto se mejora sustancialmente el comportamiento post fisura miento aumentando su ductilidad. De esta forma, Las fibras sintéticas ayudan en mayor rango al control de fisura miento donde las cargas no sean notables, a diferencia de las metálicas que son usadas en mayor proporción para controlar los mismos fenómenos, pero tienen mejor comportamiento en cargas mayores, sin embargo, la influencia de las fibras no vas más allá a control de la retracción plástica inicial, por tanto, este estudio limita el uso de estos adicionales a concretos no estructurales. (Cossio et al., 2012)

Desde hace unos años se han venido utilizando fibras reciclables óptimas para pavimentos y a su vez amigables con el medio ambiente, entre uno de estos proyectos se investigó el uso de fibras industriales (polipropileno) y reciclables (bolsas de leche y caucho), estudio del cual se dedujo que con el uso de fibras de polipropileno se reduce considerablemente el espesor, sobre todo en tráfico bajos y suelos con módulo de elasticidad mayores a 50 MPa. La adición de fibras en el concreto, a pesar de que no aportan resistencia a compresión, poseen una buena resistencia a flexión, siendo el porcentaje óptimo de adición de 1% 0,07 MPa para las fibras de polipropileno, 0,7% 0,14MPa para tiras de caucho y 1% 0,15MPa para tiras de bolsa de leche, dichas adiciones pueden considerarse cuando se requieran pavimentos económicos como en vías rurales, locales de bajo tráfico o estacionamientos, debido a que para grandes volúmenes vehiculares la sola adición de fibras es muy pobre para la gran durabilidad que debe aparenta.. (Marcano & Lizcano, 2013)

En otro estudio se usó hormigón prefabricado para permitir una rápida reparación del pavimento y mejorar su rendimiento, para esto se utilizó hormigón reforzado con látex y se



determinó el tipo de refuerzo de fibra y cantidad de látex añadido que exhibió el mejor rendimiento. Tres tipos de fibras de refuerzo fueron evaluados: alcohol polivinílico, polipropileno y fibra de nylon. Y los resultados de las pruebas mostraron que el aumento del contenido de látex mejoró la resistencia a la flexión, resistencia a la permeabilidad, resistencia a la abrasión y al impacto. Cuando se compararon los tipos de fibra reforzada se demostró que el hormigón que contenía la fibra de nylon tenía el mejor rendimiento, por lo que se concluye que esta es la fibra de refuerzo más deseable para pavimento de hormigón prefabricado, debido al requerimiento de un proceso de adecuación de fibra inicial. (Kim & Park, 2013)

Recientemente se hizo una investigación en la Universidad Politécnica de Valencia en la cual se obtuvieron los mejores resultados en aquellos hormigones con mayor cantidad de fibras. Se concluyó que las fibras de polipropileno disminuyen la trabajabilidad del hormigón en estado fresco, esto se debe en parte a que incrementan el aire ocluido en la mezcla, de forma que dificulta su compactibilidad; este efecto aumenta proporcionalmente al incremento de la cantidad de fibras adicionadas. Algunos estudios han demostrado que el empleo de ceniza volante cuando se agregan fibras de polipropileno elimina los problemas de trabajabilidad y segregación que éstas suelen provocar. El hecho de emplear hormigones con fibras obliga al empleo de aditivos fluidificantes, porque de otra forma sería muy complicado obtener consistencias trabajables en las amasadas sin modificar la cantidad de agua. (José & Jovells, 2016)

Una innovación con respecto al uso de fibras en la obtención de pavimentos ultrarresistentes se refiere a la evaluación de una mezcla reforzada con fibra híbrida macro sintética; en este caso están compuestas de polipropileno y polietileno con fibras de aramida que poseen características adecuadas de resistencia y cohesión e incluso también como un estabilizador empleado para reforzar el suelo. Estas fibras se han utilizado para mejorar el rendimiento de los hormigones asfálticos frente a daños y grietas de fatiga. Estas fibras tienen un papel eficaz en el aumento de la vida útil de los pavimentos debido a la carga repetida mediante el control de las grietas térmicas, de reflexión y de fatiga, reduciendo también el enrejado de la mezcla.



De acuerdo con los resultados obtenidos, las fibras híbridas macro sintéticas del suelo mejoran el rendimiento del hormigón asfáltico frente a los daños debidos a las roturas (deformaciones permanentes), a las grietas por fatiga ya las grietas térmicas, por lo tanto, ayudan a reducir el espesor final del pavimento aumentando la resistencia de la mezcla. (Tanzadeh et al., 2017)

Se ha demostrado que la adición de macrofibras a losas de hormigón en el suelo aumenta la capacidad de flexión, resistencia a la fatiga, reduce las tasas de deterioro de grietas y ayuda a la transferencia de cizalladura a través de las uniones y grietas. (LaHucik et al., 2017)

Entre las variaciones de la innovación con fibras se encuentran el mejoramiento en las propiedades mecánicas del pavimento usando diferentes longitudes y dosificaciones de fibras, de lo que se encontró que el aumento en la longitud y en la fracción de volumen de fibra de carbono reciclado incrementa las propiedades mecánicas y la resistencia al impacto de las composiciones de mezcla reforzada, mientras que reduce la trabajabilidad. A pesar de aumentar la porosidad debido al aumento de la fracción de volumen de fibra y la longitud, la resistencia a la compresión de los especímenes reforzados aumentó. (Mastali et al., 2017)

2.3. Marco teórico

2.3.1. Fibras.

El concreto reforzado con fibras es un elemento que contiene fibras cortas uniformemente distribuidas y orientadas al azar. Éstas pueden ser metálicas, sintéticas (polipropilenos o acrílicas), de vidrio y naturales, cada una de las cuales proporcionan propiedades diferentes al concreto. Las fibras están disponibles en variedad de formas, tamaños y espesores, pudiendo ser redondas, planas, onduladas. Estos elementos se añaden al concreto durante la mezcla. Los factores principales que controlan el rendimiento del material son: las propiedades físicas de las fibras y de la matriz; y la fuerza de la unión entre las fibras y la matriz. Hay varias diferencias entre la armadura convencional y sistemas de fibra:



1. Las fibras se distribuyen generalmente a lo largo de una sección transversal dada, mientras que las barras de refuerzo o alambres se colocan sólo cuando sea necesario.
2. La mayoría de las fibras son relativamente cortas y espaciadas estrechamente en comparación con las barras de refuerzo continuo o alambres.
3. En comparación con una red de refuerzo de acero - generalmente no es posible conseguir la misma área de refuerzo en la zona de concreto, que utilizando fibras. (REVISTA CONSTRUCTIVO, 2016)

2.3.1.1. Tipos de fibras.

2.3.1.1.1. Microfibras.

Estas fibras están destinadas a evitar la fisuración del concreto en estado fresco o antes de las 24 horas. Se dosifican en el concreto para volúmenes entre 0.03% a 0.15% del mismo. Estas fibras tienen diámetros entre 0.023 mm a 0.050 mm, pueden ser monofilamento o fibriladas. Las microfibras al tener diámetros tan pequeños se califican con un parámetro denominado Denier. Denier es el peso en gramos de 9.000 metros de una sola fibra. Las microfibras son una excelente y muy económica forma de prevenir la fisuración antes de las 24 horas. Es por ello que su uso resulta muy extendido sobre todo en pisos, pavimentos, prefabricados y en general a todos los materiales cementicios, con una relación superficie expuesta/volumen alto. Si bien las microfibras en general reducen dramáticamente la tendencia a la fisuración o simplemente la eliminan antes de las 24 horas (retracción plástica), en la mayoría de las ocasiones hacen que el concreto en estado fresco, en apariencia, pierda manejabilidad o asentamiento. Es decir que el concreto reforzado con fibras puede generar problemas frente a supervisiones e interventorías a la hora de aceptar el concreto. (SIKA, 2014)

2.3.1.1.2. Macrofibras.

Estas fibras están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho de la fisura si ésta se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada. Las dosificaciones más frecuentes oscilan entre 0.2% a 0.8% del volumen del



concreto. Las macrofibras más usadas son las sintéticas y las metálicas cuyos diámetros varían entre 0.05 mm a 2.00 mm. La relación de aspecto (L/d) de las macrofibras varía entre 20 a 100. Las macrofibras se incluyen y mezclan en el concreto como si fuesen un agregado más, normalmente exigen un tiempo de mezclado adicional entre 3 a 5 minutos para garantizar su completa dispersión. Para las dosificaciones y volúmenes antes mencionados, las macrofibras metálicas o sintéticas no alteran la resistencia a la compresión y lo hacen de una manera muy leve (o despreciable) sobre las resistencias a la tensión y flexión.

En realidad, las macrofibras se incluyen en el concreto para aumentar la tenacidad del material, es decir para hacer que las estructuras, incluso después del agrietamiento de la matriz, puedan seguir siendo cargadas. La tenacidad es una propiedad que describe de una manera más completa la capacidad de un material para soportar cargas antes de colapsar. (SIKA, 2014)

2.3.1.2. Clasificación de las fibras por material.

Actualmente existen diferentes tipos de fibras para el hormigón en función de la materia prima por la cual son producidas:

- Metálicas: aceros de carbono y ligas, aluminio
- Naturales: amianto (asbesto), celulosa y carbón
- Sintéticas: nylon, polipropileno y otras

Según esto, las características mecánicas de las fibras están dadas por:



Tabla 1. Características mecánicas de las fibras.

Fibra	Diámetro (µm)	Densidad (10 ³ kg/m ³)	Módulo elástico (KN/mm ²)	Resistencia a la tracción (KN/mm ²)	Elongación en la rotura (%)
Acero	5 - 500	7,84	200	0,5 – 2	0,5 - 3,5
Vidrio	9 - 15	2,60	70 - 80	2 – 4	2-3,5
Amianto	0,02 - 0,04	3,00	180	3,30	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 7	0,5 - 0,75	8
Nylon	-	1,10	4	0,90	13 - 15
Polietileno	-	0,95	0,30	0,0007	10
Carbono	9	1,90	230	2,60	1
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,60	2,1 - 4
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 – 1	3

Fuente: (MACCAFERRI, 2015)

2.3.1.2.1. Fibras sintéticas.

Las fibras sintéticas son las que se fabrican por el hombre y son resultado de la investigación y el desarrollo de las industrias petroquímicas y textiles. Los tipos de fibras usadas en concreto son: acrílicas, aramida, carbón, nylon, poliéster, polietileno y polipropileno.

Las fibras sintéticas pueden reducir la contracción plástica y, consecuentemente, la fisuración; además pueden ayudar al concreto después que se fisura. Se producen como monofilamentos cilíndricos continuos que se pueden cortar en longitudes específicas o como filmes y cintas. Estas fibras se componen de finas fibrillas de sección transversal rectangular.

Las fibras sintéticas son generalmente utilizadas en: tabloncillos de cemento, la producción de tejas, mortero, concreto pretensado, entre otros. Una aplicación importante de las fibras sintéticas es, además, el *Whitetopping* ultradelgado, para retardar el desarrollo de baches en esta estructura de pavimento. (Silva, 2016)



2.3.1.2.1.1. Fibras sintéticas utilizadas en la investigación.

Las fibras sintéticas utilizadas en el proyecto corresponden a la categoría de macrofibras, siendo estas la TUF-STRAND SF distribuidas por Toxement.

Las fibras TUF - STRAND SF son Macrofibras sintéticas estructurales con una mezcla de polipropileno / polietileno, monofilamento, las cuales se auto fibrilan cuando se incorporan en la mezcla de concreto, utilizadas exitosamente para reemplazar la malla electrosoldada y las fibras metálicas en placas de concreto, elementos prefabricados, sometidos a esfuerzos estructurales.

Las fibras TUF – STRAND SF cumplen con la norma ASTM C-1116, para el tipo III (Syntetic Fiber – Reinforced Concrete o Shotcrete). Especificación para concreto y concreto lanzado reforzado con fibra, y están diseñadas específicamente para proveer una resistencia a la tensión equivalente a la de los refuerzos convencionales, a su vez se pueden utilizar como refuerzo equivalente a las fibras de acero y como reemplazo de la malla electrosoldada. (Group Toxement, 2016)

Principales aplicaciones prácticas:

- Pisos industriales y comerciales.
- Concreto lanzado.
- Pavimentos rígidos.
- Elementos prefabricados.
- Pisos de concreto en centros de distribución, pisos industriales y pisos de bodegas.
- Reemplaza la malla electrosoldada en placas no estructurales.
- No requiere el uso de microfibras, es auto fibrilante.
- Permite el bombeo de concreto, sin afectar las mangueras ni los equipos.
- Fácil de usar, se adiciona a la mezcla de concreto.
- No genera corrosión.



Ventajas:

- Controla y mitiga la retracción y fisuración por retracción plástica, reduce la segregación y la exudación.
- Da un control tridimensional de la contracción plástica.
- Reduce el contenido de fibra y optimiza el espesor comparado con las fibras metálicas para aplicación de concreto lanzado.
- Excelente dispersión en concreto.
- Reduce el deterioro de equipos.
- Reduce el rebote del concreto lanzado cuando se compara con fibras de acero y otras fibras sintéticas.
- Resistente a corrosión, no es magnética, no es un refuerzo estructural conductible.
- Reduce costos de colocación si se compara con la malla electrosoldada.
- Fácil de usar y puede ser adicionada a la mezcla de concreto en cualquier momento antes de la colocación.

Aplicaciones:

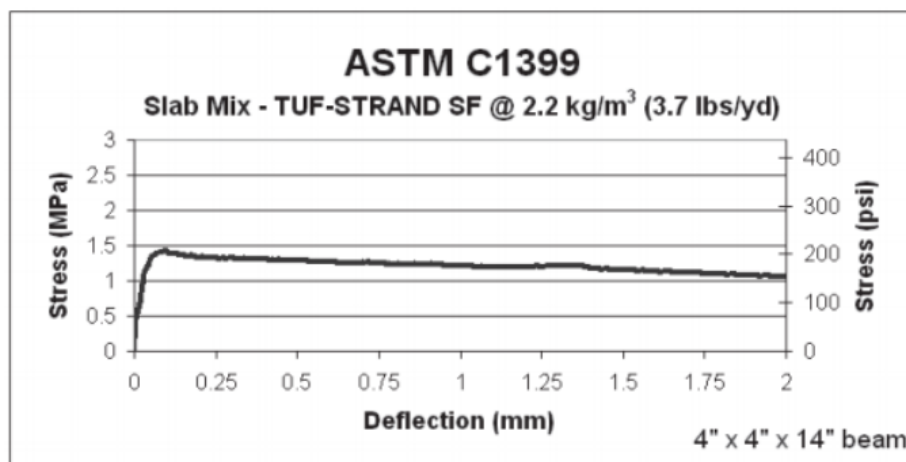
- Las fibras TUF STRAND SF se pueden adicionar a la mezcla de concreto en cualquier momento antes de la colocación del concreto. Generalmente se recomienda adicionar la fibra en la planta de producción del concreto.
- Una vez adicionadas las fibras al concreto, se debe mezclar por un mínimo de 3 a 5 minutos a la máxima velocidad para asegurar la completa dispersión y homogeneización de las fibras en la mezcla.
- Para dosificaciones de 2 – 3 kg/m³ se puede prever un asentamiento de 50 mm (2”). Para dosificaciones de 3 a 7 kg/m³ se puede esperar una pérdida de asentamiento de 75 a 125 mm (3 a 5 in).
- Para mantener la trabajabilidad deseada puede ser necesario usar aditivos reductores y/o plastificantes tales como EUCON 37, EUCON 1037 o aditivos de la serie PLASTOL.
- Adicione los aditivos de manera independiente a las fibras TUF STRAND SF.



- TUF STRAND SF es compatible con todos los aditivos de TOXEMENT.
- El uso apropiado de las fibras TUF STRAND SF no afecta la resistencia a la compresión o a la flexión del concreto o del concreto lanzado.

Con respecto a las características mencionadas anteriormente se hicieron pruebas con la macrofibra obteniendo una curva para la tensión de acuerdo con la deflexión dada:

Ilustración 1. Tensión (MPa) vs deflexión (mm).



Average Residual Strength (ARS) at given deflection					
deflection	0.5 mm	0.75 mm	1 mm	1.25 mm	Average
ARS - MPa	1.29	1.24	1.21	1.19	1.23
ARS - psi	187	180	176	172	179

Fuente: (TOXEMENT, 2016)

Dosificación:

TUF - STRAND SF puede ser adicionado al concreto en un rango de 1.8 - 12 kg/m³ dependiendo de la aplicación y requerimientos del diseño de mezcla. (TOXEMENT, 2016)



2.3.1.2.2. *Fibras de vidrios.*

Los materiales compuestos generados por las fibras de vidrio, son conocidos por sus siglas en inglés con el nombre de GRC (*Glass Fiber Reinforced Cement: Concreto reforzado con fibra de vidrio*), su matriz es un mortero de cemento hidráulico armado con fibras de vidrio. Están diseñadas para ser compatibles con el ambiente alcalino de la matriz del concreto.

Este tipo de fibras aumenta la durabilidad abarcando a su vez revestimientos químicos, formulados para ayudar en el combate de la rigidización inducida por la hidratación y en el uso de una lechada con humo de sílice para rellenar los vacíos entre las fibras, reduciendo la capacidad de infiltración del hidróxido de calcio. La mayor aplicación del concreto reforzado con fibras de vidrio es la producción de paneles de fachada. (Silva, 2016)

2.3.1.2.3. *Fibras naturales.*

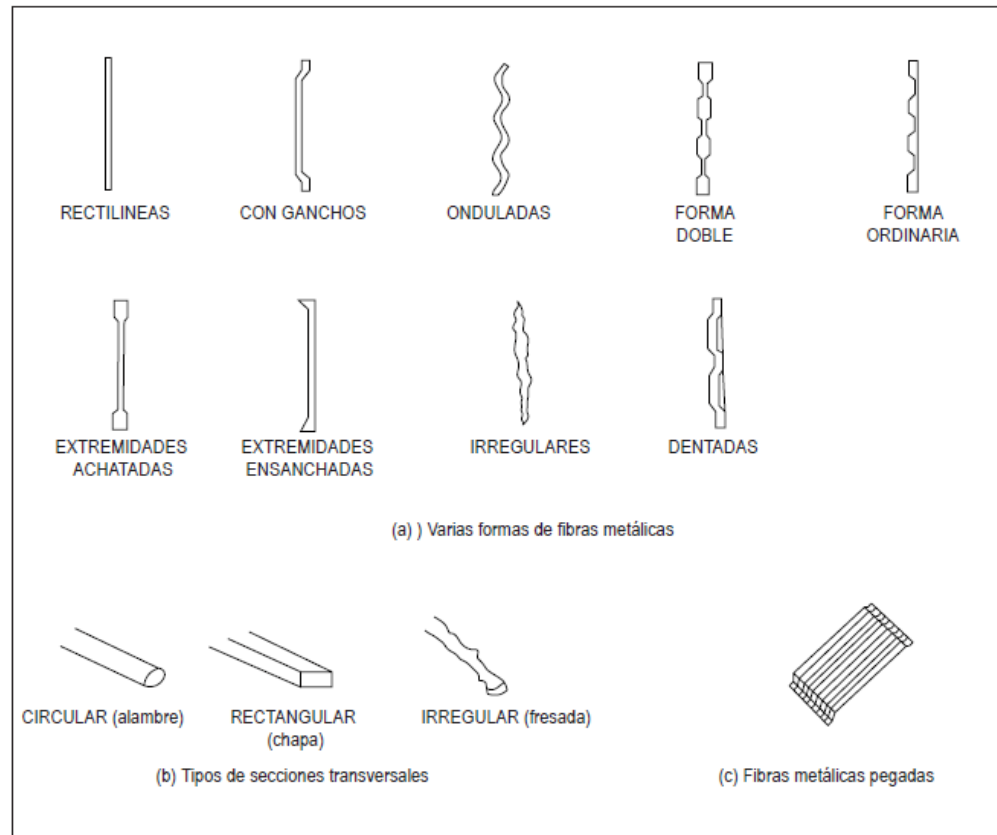
Las fibras naturales se han usado como una forma de refuerzo desde mucho tiempo antes de la llegada de la armadura convencional de concreto. Los ladrillos de barro reforzados con paja y morteros reforzados con crin de caballo son unos pocos ejemplos de cómo las fibras naturales se usaron como una forma de refuerzo. Muchos materiales de refuerzo natural se pueden obtener con bajos niveles de costos de energía, usando la mano de obra y la pericia disponibles en la región. Estas fibras se usan en la producción de concretos con bajo contenido de fibras. (Silva, 2016)

2.3.1.2.4. *Fibras de acero.*

La fibra de acero es un producto caracterizado geoméricamente por una dimensión longitud predominante respecto a las demás, con superficie pareja o trabajada empleada como refuerzo en el conglomerado del hormigón, de forma rectilínea o doblada, para poder ser dispersada de forma homogénea en la masa, sin alterar sus las características geométricas. Básicamente, la fibra es caracterizada geoméricamente por la longitud (L), por la forma y por su diámetro o diámetro equivalente (De). De la relación entre longitud (L) y el diámetro o diámetro equivalente (De) se obtiene la relación de aspecto, ($l=L/De$). (MACCAFERRI, 2015)



Ilustración 2. Diferentes tipos de fibras metálicas.



Fuente: (MACCAFERRI, 2015)

2.3.1.3. Hormigón reforzado con fibras.

Las fibras con una adecuada resistencia mecánica a la tracción, homogéneamente distribuidas dentro del hormigón, constituyen una micro-armadura la cual, se muestra extremadamente eficaz para contrastar el fenómeno de fisuración por retracción y, además de conferir al hormigón una ductilidad que puede llegar a ser considerable en la medida en que sea elevada la resistencia de las fibras y su cantidad, confiriendo en tales circunstancias una gran tenacidad al hormigón.



Mediante la adición de fibras de diferente naturaleza al hormigón, sean estas micro o macro fibras, se obtiene un nuevo material con características mecánicas diferentes de un hormigón normal. Tal compuesto es llamado Hormigón Fibroreforzado (FRC). En caso de que se trate de un refuerzo constituido por fibras metálicas se habla de “*Steel Fiber Reinforced Concrete*” (SFRC). (MACCAFERRI, 2015)

2.3.1.3.1. *Propiedades del hormigón reforzado con fibras en estado endurecido*

- Los factores que influyen en las propiedades de un hormigón fibroreforzado son las siguientes:
 - Fibras: geometría, relación de aspecto, contenido, orientación y distribución;
 - Matriz: resistencia y dimensión máxima de los agregados;
 - Interfaz fibra-matriz;
 - Probetas: dimensiones, geometría y metodología de ensayo.
- Las propiedades del hormigón fibroreforzado bajo carga (estática y dinámica) pueden ser clasificadas según las acciones siguientes:
 - Compresión;
 - Tracción directa uniaxial;
 - Tracción indirecta por splitting;
 - Tracción indirecta por flexión (medida de la tenacidad y de la energía absorbida) ;
 - Corte y torsión;
 - Fatiga;
 - Impacto;
 - Abrasión;
 - Deformación viscosa (Creep).
- El comportamiento físico químico tiene que ser evaluado según los siguientes fenómenos:
 - Retracción a corto plazo (retracción plástica);
 - Retracción a largo plazo (retracción hidráulica);
 - Durabilidad;



- Hielo-deshielo;
- Carbonatación;
- Corrosión en la presencia de cloruros (hormigón fisurado y no fisurado);
- Exposición al fuego. (MACCAFERRI, 2015)

2.3.1.3.2. Normatividad aplicada en los concretos fibroreforzados.

Entre las normas más importantes aplicadas a la evaluación del concreto fibroreforzado se encuentran:

- *Asentamiento*: NTC 369 - Método de ensayo para determinar el tiempo de fluidez del concreto reforzado con fibras a través del cono de asentamiento invertido (ASTM 995).
- *Flexión*: ASTM 1018 – Método de prueba estándar para resistencia a la flexión y primera resistencia a la fisura de la fibra en concreto reforzado (utilizando viga en el tercer punto de carga).
- *Tenacidad*: ASTM 1550 - Método de prueba estándar para resistencia a la flexión de concreto reforzado con fibra.
- *Resistencia residual*: ASTM 1399 - Método de prueba estándar para la obtención media de la resistencia residual del hormigón reforzado con fibra.
- *Resistencia al impacto*: ACI-5442R-89 - Medición de las propiedades del concreto reforzado con fibra.

2.3.2. Agregados pétreos.

Los agregados son aquellos materiales inertes de forma granular, naturales o artificiales, que a conglomeran junto con el cemento portland y con la presencia del agua conforman un todo compacto, conocido como concreto u hormigón. Es decir, los agregados se pueden considerar todos aquellos materiales, que teniendo una resistencia propia suficiente, no perturban ni afectan las propiedades y características del concreto y garantizan una adherencia suficiente con la pasta de cemento endurecido de cemento portland.(Sánchez, 2001)



Alrededor de las tres cuartas partes (del 70% a 80%) del volumen del hormigón convencional es ocupado por agregados que consisten en materiales como arena, grava o roca triturada. Estos no son menos importantes que la pasta de cemento endurecido, el agua libre, el aire naturalmente atrapado y los aditivos. (Quiroz & Salamanca, 2007) Cabe resaltar que gran parte de las características del concreto en estado plástico como en estado endurecido, depende de las características y propiedades propias de los agregados utilizados en él, las cuales deben de ser estudiadas para obtener concreto de calidad y económicas. (Sánchez, 2001)

Además, para desarrollar hormigones de características especiales como ser poco peso, aislamiento térmico o blindaje contra la radiación, se emplean, según sea el caso, agregados livianos, pesados o fabricados específicamente para obtener estas propiedades. La verificación permanente de la calidad de los agregados contribuye a mantener controlada la demanda de agua y la homogeneidad de las mezclas, favoreciendo inmediatamente a la uniformidad del proceso de producción y a propiedades de interés del hormigón. (Quiroz & Salamanca, 2007)

2.3.2.1. Propiedades de los agregados.

2.3.2.1.1. Granulometría de los agregados.

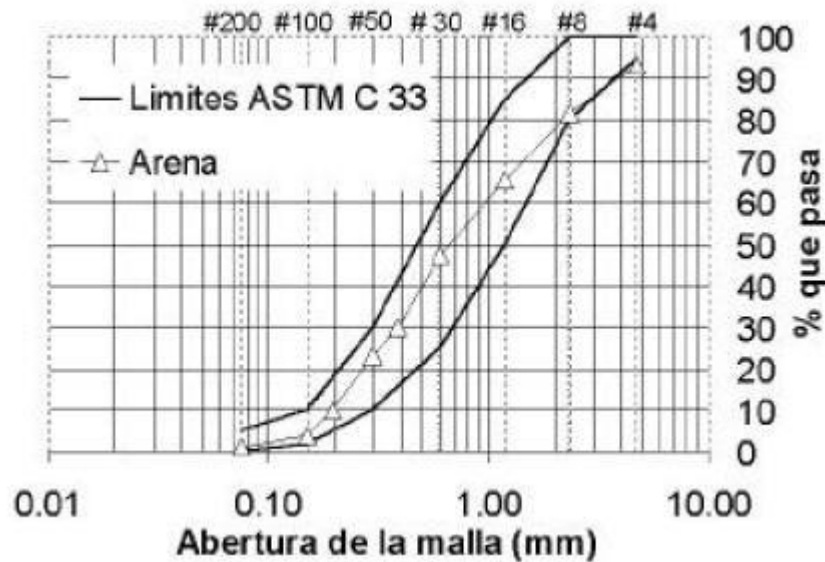
La granulometría se define como la distribución porcentual en masa de las partículas de acuerdo a su tamaño. Se la obtiene realizando un ensayo de tamices especificado en la norma ASTM C136.

Las especificaciones de límites y rangos de gradación son normalmente expresadas como el porcentaje de material que pasa en cada tamiz en una serie. Con una buena granulometría se puede llegar a obtener un óptimo acomodo de las partículas durante la vibración de la mezcla, y de esta manera se puede lograr un hormigón de buenas propiedades mecánicas con una menor pasta cementante. Unos de los parámetros importantes para una buena dosificación del hormigón son la granulometría y el tamaño máximo de los agregados, ya que estos tienen



una gran influencia en la dosificación, trabajabilidad, economía, porosidad y contracción del hormigón. El tamaño máximo del agregado grueso es la abertura del tamiz inmediatamente superior al que retiene el 15% o más según la norma ASTM; también considera, como el tamiz que retiene hasta el 10%, de los dos se debería considerar el mayor. (Quiroz & Salamanca, 2007)

Ilustración 3. Margen de la curva granulométrica del agrado fino.



Fuente: (ASTM, 2016)

2.3.2.1.2. Material fino.

En una mezcla de hormigón hay que tomar en cuenta que la presencia de limos y arcillas es perjudicial debido a los efectos negativos, tales como el incremento de agua de mezcla y los cambios volumétricos del hormigón, siendo aún más perjudicial la arcilla por su alta plasticidad. (Sánchez, 2001)

Según la norma ASTM C 33, se establece que el material que pasa el tamiz # 200 debe ser del 3 % para hormigones sometidos a abrasión y 5 % para hormigones de otro tipo, como máximo para agregados finos; y en el caso, que el material fino que pasa el tamiz #200, no



sea natural, sino obtenido por trituración de la piedra, los valores especificados pueden aumentarse en un 2 % es decir hasta un 5 y 7 % respectivamente. Para el caso de agregado grueso, la misma norma establece como porcentaje máximo el 1 % para todo tipo de hormigón.(Quiroz & Salamanca, 2007)

2.3.2.1.3. Vacío de los agregados.

El agregado por su estructura tiene huecos en su interior. El volumen total de estos vacíos expresado como un porcentaje del volumen de sólidos de un agregado se conoce como la relación de vacíos.(Rivera & Sosa, 2010)

2.3.2.1.4. Resistencia a la abrasión.

Esta es la prueba que más se aplica para averiguar la calidad global estructural del agregado grueso. Este método establece el procedimiento a seguir para determinar el desgaste, por abrasión, del agregado grueso, menor de 1½” (38 mm), utilizando la máquina de Los Ángeles. El procedimiento para determinar el desgaste por abrasión de agregado grueso mayor a ¾” (19 mm) utilizando la máquina de Los Ángeles, se describe en la ASTM C-535. El porcentaje de desgaste determinado en ambas condiciones (ASTM C 131 y ASTM C-535) no es el mismo. La muestra consistió de agregado limpio y debe ser representativa del material que se vaya a ensayar. Una vez que se alcanza el número requerido de revoluciones del tambor, se tamiza el agregado para determinar el porcentaje de agregado que ha sido reducido hasta un tamaño menor que 1.7mm (tamiz N°12). (Quiroz & Salamanca, 2007)

2.3.3. Hormigón.

Durante los últimos tiempos, el concreto se ha convertido en uno de los materiales más importantes desde el punto de vista de construcción, ya que es uno de los más ampliamente utilizados en todo el mundo debido a su extraordinaria versatilidad en cuanto a su forma, función y economía, ya que las diferentes tecnologías que se pueden desarrollar alrededor de esta hace posible una buena competencia contra materiales arcaicos de la construcción, como



lo son la piedra y la madera, y materiales modernos como el acero. Los términos generales el concreto es definido como la mezcla de un material aglutinante, un material de relleno, agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forman un todo compactado y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión. (Sánchez, 2001)

2.3.3.1. Características del hormigón.

Como se ha visto, el concreto está compuesto principalmente por cemento, agregados y agua. De igual forma también presenta alguna cantidad de aire atrapado durante el proceso de mezclado de sus componentes. Existen varias propiedades y características en el hormigón, estas se estudian principalmente con la intención de obtener y determinar un correcto diseño de mezcla el cual se define como el proceso para seleccionar la cantidad de ingredientes adecuadas, con el objeto de producir eficientemente y económicamente un concreto con un mínimo de ciertas propiedades. (Sánchez, 2001)

Algunos de los factores básicos a tener en cuenta al momento del diseño de una mezcla de concreto son:

- La trabajabilidad.
- La consistencia.
- El contenido de aire.
- La permeabilidad.
- La durabilidad.
- La retracción plástica.
- La compresión.
- La flexión.
- El módulo de rotura.
- La tracción.
- La tenacidad.
- La elasticidad.



Estos Factores o características requeridas están determinadas por el uso al que estar determinado el concreto o por las condiciones esperadas en su momento de colocación.

2.3.3.1.1. Trabajabilidad.

Según la ACI 211, la manejabilidad, conocida también como trabajabilidad, se considera como aquella propiedad del concreto mediante durante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna. (ACI 211)

En otras palabras, se puede definir como la facilidad con la que se puede mezclar, transportar, colocar y alisar una muestra fresca de hormigón, conservando su homogeneidad y características propias del hormigón. Esta propiedad es muy importante para muchas aplicaciones del hormigón pero a su vez muy difícil de evaluarla. Sus características, parten de un diseño teórico en donde principalmente la relación agua/cemento es la que nos puede dar una idea del comportamiento del hormigón, las proporciones físicas de los materiales también intervienen en la mezcla del hormigón. Aunque no se puede tener una receta exacta de un hormigón, si este presenta una baja trabajabilidad, es muy difícil de manejar, ya que no se mezcla bien y no se puede compactar de la mejor forma con lo que se obtienen hormigones de menor calidad. (Rivera & Sosa, 2010)

2.3.3.1.2. Consistencia.

Otro término utilizado para caracterizar el estado plástico del concreto es la consistencia; que aunque está relacionada con el concepto de manejabilidad, no es un sinónimo. En términos generales, la consistencia se refiere a su estado de fluidez, en otras palabras, a que tan dura o blanda es una muestra de concreto en estado plástico, por lo cual se generaliza diciendo que es el grado de humedad de una muestra. (Sánchez, 2001)

La medida del asentamiento se mide en función del asentamiento con el cono de Abrahams según la Norma internacional ASTM C143, la cual consiste en colocar la mezcla del



hormigón en un molde en forma de un cono truncado de 30cm, para Colombia es adoptada la norma NTC 396 que describe el mismo procedimiento.

2.3.3.1.3. Contenido de aire.

Durante la dosificación y el mezclado es muy común que se introduzcan burbujas de aires de diferentes formas y tamaños el cual llaman “aire naturalmente atrapado”, las cuales son removidas posteriormente en los procesos de compactación y vibración, con el fin del que la masa endurecida no presente grandes ausencias y se vea afectada su resistencia final. (Sánchez, 2001)

Las normas ASTM C138 y C173 el procedimiento para realizar los ensayos de presión, gravimétrico y volumétricos, para la determinación del contenido de aire de una mezcla fresca de hormigón. Según las normas mencionadas este procedimiento de presión de este ensayo da sustancialmente los mismos resultados del contenido de aire con respecto a los otros ensayos para hormigones con agregados densos.

2.3.3.1.4. Durabilidad.

Aunque unas de las propiedades más importantes del concreto en estado endurecido es la resistencia a compresión, existen otras propiedades que pueden ser igual o más importante de la propiedad ya mencionada. Una de ellas puede ser la durabilidad, que está ligada a las exposiciones al medio ambiente de nuestro concreto endurecido, o a causas internas del mismo, como la permeabilidad, malos materiales constituyentes o cambios volumétricos debidos a gradientes térmicos. (Sánchez, 2001)

Según la ACI 201, la durabilidad del concreto de cemento portland hidráulico se define como su resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o a cualquier otro proceso de deterior. De tal manera que un concreto durable debe mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto a un medio ambiente.



2.3.3.1.5. Permeabilidad.

La permeabilidad del concreto, así como la de cualquier otro material, consiste en la capacidad de permitir ser atravesado por un fluido a causa de una diferencia en las presiones aplicadas por el fluido, en dos caras opuestas del material. Por tanto la definición de permeabilidad está acorde con el concepto plasmado en la ley experimental de Darcy. (Sánchez, 2001)

La permeabilidad del concreto depende en gran medida de su porosidad y de la porosidad de los agregados, así mismo, puede ser causada por una compactación de baja calidad, sin embargo se han realizados estudios prácticos en donde la permeabilidad del concreto depende directamente de la permeabilidad de la pasta de cemento, ya que un concreto con una computación buena garantiza que las partículas de los agregados queden totalmente envueltas en la pasta de cemento, por otra parte la porosidad de la pasta de cemento depende de la distribución de sus poros, desde luego, existen otros factores que afectan la permeabilidad de la pasta endurecida, como son, la viscosidad del fluido, las diferencias de presiones, el espesor del material, naturaleza del fluido, el tiempo y la presencia de aire. (Rivera & Sosa, 2010; Sánchez, 2001)

2.3.3.1.6. Retracción plástica.

Son las contracciones y agrietamientos plásticos ocurren en la superficie del hormigón fresco al poco tiempo de haber sido vaciado y mientras todavía está plástico. Suelen intervenir las condiciones atmosféricas cambiantes que incrementan la relación de evaporación desde la superficie. La causa principal de este tipo de contracción es el secado rápido del hormigón en la superficie. (Quiroz & Salamanca, 2007) Se obtienen los índices más altos de evaporación cuando:

- La humedad relativa del aire es baja,
- Las temperaturas del hormigón y del aire son elevadas,



- La temperatura del hormigón es mayor que la del aire
- Sopla un viento fuerte sobre la superficie del hormigón.

2.3.3.1.7. Resistencia a la compresión.

Esta es la característica por la cual el concreto se opone a ser comprimido; la resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto, dado la importancia de esta propiedad adquiere al ser utilizados en estructuras.

Es la máxima medida de resistencia del hormigón cuando está sometido a una carga axial. Esta resistencia es expresada generalmente en MPa. ó en $Kg. / cm^2$. Para llevar a cabo este ensayo se debe recurrir a las normas ASTM C39. En donde se mide el grado o calidad del hormigón de acuerdo a su resistencia máxima definida por f'_c . Generalmente se puede medir esta resistencia a diferentes edades del hormigón, pero, la medida estándar se la realiza a los 28 días después de que el hormigón ha sido vertido. Para obtener estos datos se determinan las resistencias sacando muestras de hormigón en probetas cilíndricas, las mismas que serán ensayadas a diferentes edades, en Colombia las normas NTC 550 y 673 describen el mismo procedimiento. (Rivera & Sosa, 2010)

2.3.3.1.8. Flexión.

La resistencia a la flexión es una característica mecánica del concreto en estado endurecido, mayormente en estructuras de concreto simple, tales como pavimentos, en donde adicionalmente aparecen esfuerzos de tracción ocasionados por la flexión de las placas al paso de los vehículos.

La resistencia a flexión del concreto se determina ensayando vigas de sección cuadrada de 500 mm de longitud por 150 mm de lado, elaboradas y curadas de acuerdo con las normas ASTM C-192 y C-31(Sánchez, 2001). La capacidad del concreto simple a flexión se evalúa por medio del ensayo de vigas, durante este ensayo el concreto se ve sometido tanto a



compresión como a tensión. La capacidad a la flexión del concreto se representa por el módulo de ruptura, el módulo de ruptura es esencial para el diseño y control de calidad de estructuras como los de los pisos y pavimentos de concreto. (el constructor civil, 2011)

2.3.3.1.9. *Tracción.*

El concreto posee muy baja resistencia a la tracción y por tanto esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras convencionales. Sin embargo, la tracción tiene importancia en el agrietamiento del concreto debido a la restricción de la contracción inducida por secado o por disminución de la temperatura. (Sánchez, 2001)

Durante su vida útil, el concreto no se escapa a la contracción, sin embargo, la contracción por sí sola no es el problema; el problema comienza cuando el concreto está unido a objetos fijos tales como muros, columnas, losas adyacentes o el suelo natural. Cuando esto sucede se desarrollan esfuerzos de tracción en el concreto: si estos esfuerzos son superiores a su resistencia a la tracción, se presentan grietas o fisuras. La solución al problema incluye: reducir el encogimiento, las restricciones al encogimiento e incrementar la resistencia a la tracción del concreto y el tiempo en que ocurre, ya sea retardando la contracción hasta que el concreto tenga más resistencia, forzando las fisuras a localizarse en el sitio adecuado, o aceptando lo inevitable: tapar la losa con una baldosa o un tapete. (Londoño, 2012)

2.3.3.1.10. *Módulo de rotura.*

El esfuerzo máximo de flexión se denomina módulo de rotura (MR) y se calcula cuando la falla ocurre dentro del tercio medio de la viga según la fórmula:

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

- MR = módulo de rotura del concreto, en kg/cm²



- P = carga máxima aplicada en kg
- L = luz libre entre apoyos en cm
- b = ancho de la viga en cm
- d = altura de la viga en cm

Por otra parte el ensayo descrito en la norma ASTM C-293 consiste en apoyar las vigas de igual forma que en la norma ASTM C-78, pero con la aplicación de carga en el centro de la luz. En este caso el módulo de rotura se calcula según la siguiente expresión:

$$MR = \frac{3Pa}{2bd^2}$$

a = distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga, en cm.

Es de anotar que el valor obtenido por medio de estas fórmulas no coincide con la resistencia real de la tracción del concreto, principalmente porque la aplicación supone un comportamiento elástico del concreto por la falla por tracción, por lo cual no es cierto; a pesar de lo anterior el módulo de rotura del concreto es una medida útil para el diseño de pavimentos. (Sanchez, 2001)

2.3.3.1.11. *Elasticidad.*

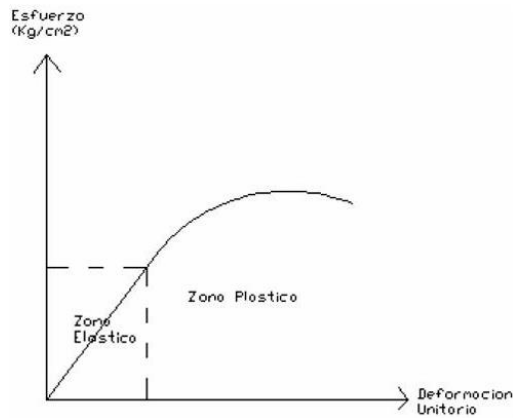
La elasticidad, es la propiedad mecánica que hace que los materiales sufran deformaciones reversibles por la acción de las fuerzas exteriores que actúan sobre ellos. La deformación, es la variación de forma y dimensión de un cuerpo. Un material es elástico cuando la deformación que sufre ante la acción de una fuerza cesa al desaparecer la misma.

Los materiales totalmente elásticos pueden llegar hasta cierta deformación máxima, es lo que se conoce como límite elástico. Si se sobrepasa este límite, la deformación del material es permanente y sus propiedades cambian. Si el esfuerzo que incide sobre el material supera las fuerzas internas de cohesión, el material se fisura y termina por fallar. (Osorio, 2011)



A continuación, se observa una gráfica en la cual se muestra el comportamiento elástico del concreto de acuerdo a sus diferentes fases:

Ilustración 4. Grafica esfuerzo- deformación.



Fuente: (Osorio, 2011)

2.3.3.1.12. Diseño y dosificación.

El proporcionamiento de mezclas de concreto o diseño de mezclas, es un proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad peso unitario, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas. Estas proporciones dependen de las propiedades y características de los ingredientes usados, de las propiedades particulares del concreto especificado, y de las condiciones particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado. El método más común de diseño es probablemente práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado A.C.I – 211.

Para realizar el respectivo diseño de mezcla se deben tener en cuenta ciertas consideraciones básicas como son las propiedades requeridas de concreto fresco y las propiedades en estado



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



endurecido debido a que estas facultan al ingeniero para determinar las proporciones de mezclas. Sumado a esto, la economía es un factor importante en el diseño desde el punto de vista de factibilidad del proyecto; el costo de producción del concreto está constituido por el costo de los materiales (cemento, agregados finos y gruesos, agua y aditivos), la mano de obra, los equipos utilizados y el grado de control de calidad que se tenga en el sitio de trabajo.

Se debe diseñar una mezcla económicamente eficiente y productiva, por lo que se debe optimizar la proporción de los materiales empleados. De esta forma en lo posible reducir el uso del cemento debido a que es el material más costoso de la mezcla. Con respecto a la mano de obra, esta depende de la organización del sitio de trabajo y del tipo de equipo disponible. Por último, la economía de un diseño de mezcla particular también está relacionada con el equipo disponible y las prácticas de producción y colocación. Estos factores son medidos por los grados de control ejercitados en el trabajo.

El otro aspecto que se debe considerar es la tecnología existente en el sitio de obra para producir el concreto, por lo que hay diferentes sistemas de dosificación, mezclado, transporte, colocación y curado, que tienen influencia sobre las propiedades del concreto. Es importante que la dosificación del cemento y los agregados siempre deben hacerse por peso, pues la medida de estos o de cualquier otro sólido con base en su volumen puede conducir a grandes errores al no tenerse en cuenta el grado de compactación o abultamiento de las partículas, el grado de saturación o humedad de los agregados, ni el volumen absoluto de cada ingrediente en el momento de la dosificación. Por ello, solo el agua y los aditivos líquidos pueden ser medidos con precisión, con base en el volumen. (Sanchez, 2001)



3. Objetivo general

- Elaborar un diseño de mezcla para pavimento hidráulico mejorado en términos de flexión adicionando fibras sintéticas de polipropileno y polietileno con el uso de agregados pétreos propios de la zona, con el fin de obtener un pavimento más económico y durable.

3.1. Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento del pavimento en términos de flexión de acuerdo con las dosificaciones de fibras de polipropileno y polietileno agregadas a la mezcla.
- Hacer análisis comparativos de resistencia a la flexión con los resultados obtenidos de las muestras ensayadas entre mezclas hidráulicas sin adición fibra y las mejoradas con fibras, a la luz de la norma INV-E-402.
- Evaluar la resistencia y durabilidad de los agregados pétreos seleccionados provenientes de la zona Caribe, utilizados en la fabricación del concreto hidráulico para pavimento.
- Comparar los resultados obtenidos desde el punto de vista de durabilidad y economía del pavimento fabricado, con respecto una muestra patrón ensayada.
- Caracterizar todos los agregados pétreos usados en la fabricación de los concretos hidráulicos, basados en la calidad y cumplimiento de la normatividad vigente del INVIAS 2013.



4. Alcance

Esta investigación sobre los pavimentos rígidos con fibras sintéticas está enfocada en la región Caribe más específicamente en la ciudad de Cartagena, lugar del cual serán extraídos de las canteras los agregados pétreos propios de la zona, a los cuales se le aplicarán ensayos de resistencia al desgaste por abrasión, análisis granulométrico y caracterización física; con el fin de conocer sus características físicas y mecánicas. Se prevé que el número aproximado de cilindros a ensayar serán 48, y el de viguetas serán 24. Esto se realizará bajo la luz de las normas INVIAS, en los laboratorios de la Universidad de Cartagena y eventualmente en los de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Se estima que la materialización de la siguiente investigación se llevará a cabo en un tiempo de 14 semanas a partir del inicio del periodo académico 2018-1 de la universidad de Cartagena, que se prevé será el 5 de febrero de 2018. Esto va desde la adquisición de los agregados y materiales necesarios para diseñar la mezcla, hasta la realización de los especímenes y ensayos, donde las variables a intervenir serán los agregados, el concreto utilizado y las fibras sintéticas a adicionar, siendo estas últimas el factor innovador a tener en cuenta ya que se espera que su presencia sea primordial en el mejoramiento del módulo de rotura y la resistencia a flexión, propiedades obtenidas mediante la realización de los ensayos de flexión por vigueta y de tracción indirecta respectivamente; siendo tales propiedades fundamentales para todo pavimento de alto desempeño.

Se espera obtener un pavimento con un módulo de rotura superior al de un pavimento convencional sin adición de fibras, lo que conlleva a un incremento en su resistencia, una disminución en la formación de fisuras y en la permeabilidad, y por consiguiente mayor durabilidad. Con base a esto, el producto final de la investigación pretende obtener un pavimento hidráulico de alto desempeño desde el punto de vista de la flexión y del módulo de rotura, además una buena selección de agregados y un óptimo diseño de mezcla permitirá obtener un pavimento comercial con un menor espesor, o en otro caso con igual espesor, pero con mayor resistencia. Ambas posibilidades traducen beneficios económicos debido a la



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



disminución de costos ya sea por disminución de volúmenes de hormigón o por eliminación de la malla electrosoldada, lo que significa una aplicabilidad práctica de este pavimento por parte las empresas del sector al elevar su competitividad. Además, este proyecto propone ser un punto de partida para futuras investigaciones en materia de pavimentos de alto desempeño usando fibras, así como un inicio para investigaciones innovadoras con respecto al uso de este material, ya sea usando otro tipo de fibra, distribuidores diferentes, fibras híbridas e incluso reciclables y amigables con el medio ambiente.

Con respecto a las limitaciones que tendría el proyecto investigativo cabe resaltar que, es probable que el módulo de rotura no aumente de forma tan considerable como si se hubiesen modificado las fibras con algún tipo de tratamiento superficial, debido a que estas últimas brindan un incremento mayor en la flexión. Sumado a esto, los agregados predominantes en la zona Caribe Colombiana son de origen calcáreo, lo que se traduce en una menor capacidad de resistencia por parte de la losa de pavimento en comparación con una en la cual hayan sido empleados agregados de origen ígneo, debido a que estos últimos pueden aportar mayor capacidad portante a la estructura.



5. Metodología

Este proyecto abarcó una línea de investigación mixta (se analizaron cuantitativa y cualitativamente los datos para realizar las respectivas discusiones y obtener conclusiones del fenómeno) donde se pretendió aumentar la resistencia del pavimento hidráulico utilizando fibras sintéticas, es decir, mejorar las propiedades mecánicas ligadas a la resistencia a la flexión, compresión y a la tracción indirecta. Estas variables fueron dependientes de ciertas características como: la calidad del concreto (ligada al asentamiento), la calidad de los agregados (dependiente de la granulometría, densidades, porcentaje de vacíos, humedad, durabilidad, caras fracturas, índice de aplanamiento y alargamiento) y los procesos de fabricación del concreto (curado, fabricación con fibras, dosificación de las fibras). Los ensayos de los agregados y los del concreto en estado fresco se realizaron en el laboratorio de la Universidad de Cartagena, y los correspondientes al concreto en estado endurecido se llevaron a cabo en el laboratorio Barrios Padilla SAS durante un periodo de 9 semanas.

5.1. Materiales

5.1.1. Cemento.

El cemento utilizado en todas las pruebas experimentales fue el correspondiente a Cemento hidráulico de uso general de la marca Cemex, este cemento fue donado por la empresa Ingueto y Cia Ltda; la cantidad que se usó de este material se mantuvo constante en todas las pruebas. Este cumplió con lo indicado en el Artículo 501 de Las Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras. (INVIAS, 2016)



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



Ilustración 5. Cemento de la marca Cemex de uso general utilizado en fabricación de los especímenes.



Fuente: (Cemex, 2018)

5.1.2. Agua

Para la realización del concreto se utilizó agua potable del grifo por considerarse adecuada debido a que es limpia y libre de cualquier sustancia perjudicial para el concreto terminado; esta es la que se usa comúnmente en las obras. Según lo descrito en el numeral 630.2.3 del Artículo 630 de Las Especificaciones Generales De Construcción De Carreteras, esta se puede usar sin necesidad de realizar ensayos de calificación. (INVIAS, 2016)

5.1.3. Agregados

Se utilizaron agregados extraídos de una cantera de materiales silicios tipo canto rodado cercana a la ciudad de Cartagena donados por la empresa Ingueto y Cia Ltda, el agregado grueso seleccionado fue de un tamaño de $\frac{3}{4}$. Con el objetivo de realizar la respectiva caracterización de los agregados gruesos y finos, se llevaron a cabo los ensayos descritos en la *Tabla 2* y en la *Tabla 3*

Tabla 2. Propiedades necesarias para el agregado fino para su utilización en un pavimento.

Característica del A. Fino	Norma	Requisito
Índice de plasticidad (%)	E-126	NP
Terrones de arcilla max(%)	E-211	3
Pasa 200 max(%)	E-214	3
Contenido de sulfatos max(%)	E-233	1,2
Absorción	E-222	4
Densidad seca		-



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



Densidad Saturada		-
Densidad Aprente		-
Densidad Bulk	E-217	-
% de vacíos		-

Fuente: Autores.

Tabla 3. Características necesarias para el agregado grueso en su utilización en un pavimento.

Característica	Norma	Requisito
Desgaste (M. Ángeles) max(%)	E-218	40
Terrones de arcilla max(%)	E-211	3
Caras fracturadas min(%)	E-227	60
Contenido de sulfatos max(%)	E-233	1
Absorción		-
Densidad seca	E-222	-
Densidad Saturada		-
Densidad Aparente		-
Densidad Bulk	E-217	-
% de vacíos		-
Humedad		-

Fuente: Autores.

5.1.4. Aditivo

Se utilizó el aditivo superplastificante SIKA VISCOCRETE 2100 el cual fue donado por la empresa Sika Colombia SA, este brinda una mejor trabajabilidad a las mezclas adicionadas con fibras, debido a que estas se tornan menos trabajables a medida que aumenta la dosificación de las mismas en la matriz de concreto ya que la mezcla va perdiendo manejabilidad y por consiguiente el asentamiento disminuye en amplia proporción; por lo tanto, se requiere mayor compactación y acomodación utilizando la varilla. En estos casos se utilizó este aditivo aumentando su cantidad a medida que se incrementaba la dosificación de la fibra, lo que permitió obtener un mejor asentamiento y excelente manejabilidad.



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



Ilustración 6. Aditivo supe plastificante utilizado en las muestras adicionadas con fibras.



Fuente: Autores.

5.1.5. Fibras

Las fibras utilizadas en las tres distintas amasadas fue la correspondiente a la TUF-STRAND SF distribuida por Toxement donadas por la empresa Ingueto y Cia Ltda, estas son Macro fibras sintéticas de polipropileno y polietileno autofibrilantes. A continuación, se puede observar en la *Tabla 4* las propiedades físicas de la fibra usada:

Tabla 4. Principales características físicas de la fibra TUF-STRAND SF.

Propiedades físicas de la fibra Tuf-Strand SF	
Material	Polipropileno y Polietileno
Gravedad específica	0.92
Resistencia a tensión	600-650 Mpa
Módulo de elasticidad	9.5 Gpa
Punto de llama	330 C°
Longitud de fibra	50 mm
Relación de aspecto	74
Color	Blanco
Absorción de agua	Despreciable
Resistencia a Alcalis	Excelente
Resistencia a ácidos	Excelente
Resistencia a moho-hongos	Excelente
Dosis típica	1.8-12 kg/m3
Denier	3000

Fuente: Autores.



5.2. Dosificaciones para fibras en concreto para pavimentos

Las dosificaciones escogidas de la fibra TUF – Strand SF de la empresa Toxement fueron: 6, 12 y 18 Kg/m³ respectivamente. Se seleccionaron estas dosificaciones debido a que comercialmente esta fibra cuenta con una recomendación de uso que va dentro del rango de 1,8 a 12 Kg/m³; por tanto, la tercera dosificación escogida fue decisión propia de los autores ya que se quiso conocer el comportamiento del concreto adicionado con fibras cuando se excedían estas recomendaciones. Además, se consideró necesario tener en cuenta tres puntos de referencia en cada ensayo para cada dosificación, con el objetivo de visualizar una tendencia más precisa de este tipo de comportamiento.

Tabla 5. Numero de especímenes a elaborar dependiendo de las dosificaciones de las fibras.

Numero de muestras a ensayar			
Dosificaciones Kg/m ³	Uso		
	Compresión simple	Tracción indirecta	Resistencia a la Flexión
0	9	3	3
6	3	3	3
12	3	3	3
18	3	3	3
Total cilindros	30		
Total viguetas	12		

Fuente: Autores.

5.3. Ensayos en los agregados

Los agregados pétreos son una variable importante en la fabricación del concreto para pavimentos, ya que estos incrementan y benefician características mecánicas finales de este, siempre y cuando tengan una buena calidad y composición (INVIAS, 2013); es por esto que se debe contemplar el artículo 500 INVIAS, donde se establecen todos los parámetros y características que se tienen en cuenta en la fabricación y elaboración de concreto para pavimento, así como la calidad de los componentes que se usan en los mismos.



En todos los ensayos de agregados pétreos se hizo la preparación de una muestra siguiendo la metodología descrita en la norma INV E-202, con el objetivo de reducir las muestras de gran volumen de agregado y llevarlas a un tamaño conveniente y representativo para la correcta ejecución de los ensayos contemplados. En este caso se hizo la reducción en tamaño mediante cuarteo, debido a que las muestras contenían humedad libre en las superficies de las partículas; para esto se usó una pala, un palustre y un recipiente rectangular plano. Este procedimiento descrito en la norma INV E-202 se realizó para cada uno de los ensayos de esta investigación, los cuales están contemplados en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Ensayos realizados a los agregados con el fin de obtener su calidad.

Norma INVIAS	Título
E-213-13	Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
E-217-13	Densidad Bulk y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto.
E-218-13	Resistencia a la degradación de los agregados de los tamaños menores de 37, 5 mm por medio de las máquinas de los ángeles.
E-222-13	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.
E-223-13	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.
E-211-07	Terrones de Arcilla
E-227-13	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.

Fuente: Autores.



Ilustración 7. Reducción de las muestras del agregado pétreo empleado el método de cuarteo.



Fuente: Autores.

En la *Tabla 6* se observan todos los ensayos realizados a los agregados utilizados en el presente proyecto, así como la norma que se utilizó de referencia para llevar a cabo los procedimientos con el correcto control de calidad. En la *Tabla 2* y *Tabla 3* se pueden ver los requisitos de calidad que deben cumplir los agregados para pavimentos de concreto hidráulico según el capítulo 5.1 de LAS ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, según lo cual se comprobará si los agregados utilizados en la fabricación del concreto cumplen con la normatividad vigente del INVIAS 2013.

5.3.1. Granulometría

Una vez preparada la muestra por cuarteo como lo indica la norma INV E-202, se procedió a realizar el análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos descrito en la norma INV E-213, con el objetivo de determinar la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados del material extraído de la cantera; para esto se utilizaron elementos como: Balanza, tamices y horno. Se tabularon los datos para el agregado fino y grueso respectivamente, incluyendo en esta tabulación el porcentaje de material que pasa y el total retenido.



Para chequear que el agregado fino cumpla con los requisitos granulométricos, se tuvo en cuenta que este cumpliera con los rangos establecidos en la *tabla 7*; con respecto al agregado grueso, este se ajustó a una de las gradaciones señaladas en la *tabla 8*.

Tabla 7. Granulometría requerida para el agregado fino utilizado según la norma INVIA.

Granulometría	
Tamiz	% pasa
3/8"	100
No 4	95-100
No 8	80-100
No 16	80-85
No 30	25-60
No 50	10-30
No 100	2-10

Fuente: (INVIAS, 2016)

Tabla 8. Granulometría requerida para el agregado grueso utilizado según la norma INVIA.

Tamiz	AG 1 - FRA 1	AG 1 - FRA 2	AG 2 - FRA 1	AG 2 - FRA 2	AG 3
2 1/2"	100	-	-	-	-
2"	90-100	-	100	-	-
1 1/2"	35-70	100	90-100	-	100
1"	0-15	95-100	20-55	100	95-100
3/4"	-	-	0-15	90-100	-
1/2"	0-5	25-60	-	-	25-60
3/8"	-	-	0-5	25-50	-
No 4	-	0-10	-	0-10	0-10
No 8	-	0-5	-	0-5	0-5

Fuente: (INVIAS, 2016)

5.3.2. Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos

La muestra a ensayar se preparó mediante cuarteo según lo descrito en la norma INV E-202 y se utilizó el procedimiento de varillado o apasionado explicado en la norma INV E-217.



Ilustración 8. Recipiente de volumen conocido y varilla compactadora que permite hallar densidad bulk.



Fuente: Autores.

En este ensayo se utilizó una varilla cilíndrica compactadora de 5/8", un recipiente de medida, una balanza, una pala y el pie de rey; para lo cual se utilizaron las siguientes fórmulas con el objetivo de calcular la densidad bulk y los vacíos en los agregados:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

$$\% \text{ vacios} = \frac{(S * \rho_w) - M}{S * \rho_w} * 100$$

Donde:

- M: Densidad bulk del agregado, Kg/m³(lb/pie³);
- G: Masa del agregado más el recipiente de medida, kg(lb);
- T: Masa del recipiente de medida, kg(lb);
- V: Volumen del recipiente de medida, m³(pie³);
- F: Factor de medida, 1/m³ (1/pie³).
- S: Gravedad específica bulk (material seco) determinada según las normas INV E-222 (agregados finos) o INV E-223 (agregados gruesos);
- M: Densidad bulk del agregado, Kg/m³(lb/pie³);



- ρ_w : Densidad del agua, 998 Kg/m³(62.4 lb/pe3)

5.3.3. Resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles.

Una vez obtenida la granulometría del agregado grueso se determinó su resistencia al desgaste, esto se hizo siguiendo los lineamientos descritos en la norma INVIAS E-218 titulada: “Resistencia al desgaste de los agregados menores de 37,5 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los ángeles.” Los materiales necesarios para la realización de este experimento fueron: una balanza, tamices y la máquina de los ángeles, la cual está presente en el laboratorio de pavimentos de Universidad de Cartagena. Este ensayo permite saber si el agregado es de buena calidad, debido a que obteniendo el porcentaje de desgaste se puede descartar la utilización de un agregado de baja resistencia, el cual no sería apto a la hora de conformar y aportar resistencia mecánica a un pavimento rígido.

Ilustración 9. Máquina de los Ángeles del laboratorio de la Universidad de Cartagena.



Fuente: Autores.

El porcentaje de desgaste dio una referencia de la resistencia del agregado, que se halló de la siguiente manera:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$



Donde:

- P1: Masa inicial de la muestra seca,
- P2: Masa de la muestra previamente desgastada, lavada y secada.

5.3.4. Densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino.

Para hallar las densidades promedio del agregado fino se procedió según la metodología plasmada en la norma INVIAS E-222 titulada: “*Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.*” La norma describe a la perfección los procedimientos necesarios para hallar la densidad seca, la densidad saturada superficialmente seca, la densidad aparente y la absorción del agregado fino, datos necesarios en el procedimiento para la realización del diseño de mezcla; para la realización del experimento se procedió con los utensilios del método gravimétrico que fueron: un picnómetro de 500mL, una balanza y un horno.

Ilustración 10. Balanza y picnómetro de 500 ml necesarios para la realización del ensayo.



Fuente: Autores.

Para la realización de los cálculos de las diferentes densidades y la absorción se utilizaron las siguientes formulas:

$$Densidad\ SH\ (Kg/m^3) = \frac{997.5 * A}{B + S - C}$$



$$Densidad\ SSS(Kg/m^3) = \frac{997.5 * S}{B + S - C}$$

$$Densidad\ aparente(Kg/m^3) = \frac{997.5 * A}{B + A - C}$$

$$Absorción\ \% = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

- A: Masa seca al horno,
- B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua,
- C: Masa total de picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua,
- S: Masa de la muestra en estado saturada y superficialmente seca.

5.3.5. Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso.

Para hallar las densidades promedio del agregado fino se procedió según la metodología plasmada en la norma INVIA E-223 titulada: “*Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso.*” La norma describe a la perfección los procedimientos necesarios para hallar la densidad seca, la densidad saturada superficialmente seca, la densidad aparente y la absorción del agregado fino, datos necesarios en el procedimiento para la realización del diseño de mezcla. Para la realización del experimento se utilizaron materiales como: una canasta metálica, una balanza, un estanque con agua y un horno.



Ilustración 11. Balanza y canasta metálica utilizada en la realización del ensayo.



Fuente: Autores.

Para la realización de los cálculos de las diferentes densidades y la absorción se utilizaron las siguientes formulas:

$$\text{Densidad SH (Kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 * A}{B - C}$$

$$\text{Densidad SSS(Kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 * B}{B - C}$$

$$\text{Densidad aparente(Kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 * A}{A - C}$$

$$\text{Absorción \%} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

- A: Masa seca al horno,
- B: Masa de la muestra en estado saturada y superficialmente seca,
- C: Masa de la muestra sumergida en agua.



5.3.6. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados

Para realizar este ensayo a la arena, se hizo la separación de la muestra por cuarteo como lo indica la norma INV-E-202 y se procedió a realizar el procedimiento descrito en la norma INV E-211 para determinar aproximadamente los terrones de arcilla y partículas deleznable de los agregados finos y gruesos; para esto se utilizó una balanza, recipientes, tamices, un horno y agua destilada. Se realizaron los cálculos con la fórmula:

$$P = \frac{M - R}{M} * 100$$

Donde:

- P: Porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznable;
- M: Masa de la muestra de ensayo. Para los agregados finos, corresponde a la masa de la porción más gruesa que el tamiz de 18 mm (No. 16), Para los agregados gruesos corresponde a la masa de la fracción respectiva.
- R: Masa de las partículas retenidas sobre el tamiz designado para remover el residuo.

Se tuvieron en cuenta requisitos de la *Tabla 2* y *Tabla 3* con el objetivo de verificar si los agregados cumplen con los requisitos de las especificaciones generales de construcción de carreteras.

Ilustración 12. Agregado pétreo sumergido en agua destilada con el fin de desprender las partículas deleznable.





Fuente: Autores.

5.3.7. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

La realización de este ensayo fue posible por los procesos y lineamientos descritos en la norma INV E-227 titulada: “*Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso.*” La metodología allí plasmada permitió hallar el porcentaje de partículas fracturadas del nuestro agregado grueso, información importante que describe la calidad del agregado, ya que esta característica permite un mejor comportamiento de los mismos en la matriz del concreto. Cabe resaltar que el procedimiento de clasificación fue hecho de forma manual, siendo los autores los entes subjetivos que categorizaron las muestras de agregado.

Ilustración 13. Clasificación de partículas de cara fracturada en el laboratorio.



Fuente: Autores.

Para la obtención del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso fue la siguiente:

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

Donde:

- P: Porcentaje de caras fracturadas;
- F: Masa de partículas fracturadas,



- N: Masa de las partículas en la categoría de no fracturadas.

5.4. Diseño de mezcla

Se utilizó la metodología de diseño propuesta por la A.C.I 211.1, y a su vez se tuvo en cuenta la norma INVIAS y la ASTM C33 con el objetivo de verificar que los agregados cumplieran con los requisitos mínimos de calidad en cuanto a gradación para su utilización en el concreto hidráulico. Este diseño de mezcla está centrado en medir las cantidades de materiales de: cemento, agua, grava y arena en peso y volumen tanto para la mezcla en estado fresco como endurecido.

5.5. Fabricación de muestras

Tabla 9. Especímenes fundidos para cada diseño de mezcla.

Concreto	No Amasadas	M3/Amasadas	Tipo de Ensayo	No de Especímenes
CSF	1	0,062	Compresión simple 7 días	3
			Compresión simple 14 días	3
			Compresión simple 28 días	3
			Tracción indirecta 28 días	3
			Flexión vigueta 28 días	3
CCF-6KG	1	0,047	Tracción indirecta 28 días	3
			Flexión vigueta 28 días	3
			Compresión simple 28 días	3
CCF-12KG	1	0,047	Tracción indirecta 28 días	3
			Flexión vigueta 28 días	3
			Compresión simple 28 días	3
CCF-18KG	1	0,047	Tracción indirecta 28 días	3
			Flexión vigueta 28 días	3
			Compresión simple 28 días	3

Fuente: Autores.

Para la fabricación de muestras se tuvo en cuenta una nomenclatura específica de acuerdo a la dosificación de fibras en la mezcla, siendo CSF el concreto sin adición de fibras, CCF-6 el adicionado con fibras con una dosificación de 6 Kg/m³, CCF-12 el adicionado con 12 Kg/m³



y CCF-18 el adicionado con 18 Kg/m³; el proceso de fabricación se dividió en varias etapas, donde en cada uno solo se utilizó un tipo de concreto, para facilitar los tiempos de fundición.

5.5.1. Elaboración de especímenes

Los procesos correspondientes a la elaboración y curado de especímenes se hicieron en los laboratorios de la Universidad De Cartagena, para estos procedimientos se utilizó una mezcladora de marca Bauker la cual fue prestada por la empresa Ingueto y Cia Ltda, y se procuró que todos los materiales estuvieran almacenados con el control de calidad necesario. Las dosificaciones de cada material se calcularon previamente con el diseño de mezcla para luego pesarlas de acuerdo a la amasada, con el objetivo de separar las cantidades de cada uno y tener preparados los moldes cilíndricos y prismáticos (estos se lubricaron con aceite para facilitar el desencofrado), así como el cono de Abrahams y la varilla compactadora junto a la mezcladora para tener todas las herramientas listas para la amasada.

Con respecto al procedimiento para la mezcla de concreto se siguió lo descrito en la norma INV E-402-13, se procuró que el tamaño de la muestra dejara un porcentaje mayor al 10% de residuo luego del moldeo de los especímenes proyectados para el ensayo. Para continuar con la elaboración de la mezcla se procedió a humedecer las paredes internas de la mezcladora antes de colocar los materiales con el objetivo de que estos no se pegaran y se pudieran mezclar en su totalidad con la mezcla, luego se procedió a introducir el agregado grueso de tipo silicio junto con la mitad del agua de amasado (con una parte del aditivo SIKA VISCOCRETE 2100 diluido en ella) antes de que la mezcladora comenzara la rotación; al cabo de unas rotaciones se le incorporó el agregado fino, el cemento y el resto del agua con el aditivo y se dejó que todos los elementos se mezclaran de forma homogénea para añadir las fibras (si era el caso) y se esperaba que la mezcla recuperara su uniformidad y homogeneidad antes de detenerla. Una vez se detuvo la máquina, se depositó la mezcla en una carretilla y se remezcló con un palustre antes de depositarla en los moldes con el fin de darle uniformidad y homogeneidad.



Se hizo la respectiva prueba de asentamiento con el cono de Abrahams para cada amasada según lo descrito en la norma INV E-404, proceso que se encuentra detallado en el Item 5.6 de este documento, luego se elaboraron los especímenes en el laboratorio en una superficie rígida con el objetivo de evitar vibraciones y se colocó la mezcla en cada molde utilizando un palustre para luego hacer la respectiva distribución con la varilla de compactación, y finalmente adicionar 2 capas de espesor aproximadamente igual para los cilindros (con dimensión de 4” por 8”) apasionando cada una con 25 golpes y 2 capas para las viguetas (con dimensión de 150x150x550 mm) con 75 golpes cada una. Por último, se removió el exceso de concreto y se enrasó con el palustre para luego transportarlos a un sitio más seguro del laboratorio de la Universidad de Cartagena. Luego de 24 horas de haber fundido los especímenes, se removieron de sus moldes y se curaron sumergiéndose en una piscina con agua procurando que cubriera toda su superficie.

5.6. Ensayos del concreto en estado fresco y curado

El ensayo siguiente corresponde a lo estipulado en la norma INV E-404, en la cual se contempla el procedimiento con el que se determinó el asentamiento del concreto usando materiales como: un molde metálico con forma interior de un tronco de cono, varilla cilíndrica compactadora de hierro liso y la muestra representativa del concreto obtenida de acuerdo con la norma INVIA E-401.

Ilustración 14. Ensayo de Slump realizado a la muestra patrón.





Fuente: Autores.

Una vez obtenidos los datos del Slump y de haber realizado los especímenes de concreto se procedió a realizar el curado de las muestras en el laboratorio bajo estricto control de calidad, dejando los especímenes, una vez sacados de las formaletas, sumergidos en agua con el fin de controlar la retracción plástica y evitar el fisuramiento inicial del mismo, contemplando los lineamientos indicados de la norma INVIA E-402 que se titula: “*Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión.*”

Ilustración 15. Concreto en estado fresco con adición de fibras y plastificante.



Fuente: Autores.

5.7. Ensayos del concreto en estado endurecido

El concreto fue ensayado para entender cómo afecta el uso de fibras sintéticas en las propiedades mecánicas del mismo, lo que resultó determinante para poder saber si el uso de fibra permitió obtener un pavimento de alto desempeño. Los ensayos que se realizaron son: la resistencia a compresión, la resistencia a flexión y a tracción indirecta; los cuales están regulados bajo las normas colombianas que controlan los ensayos sobre el concreto para pavimentos propuesto por el ministerio de vías y transportes de Colombia como lo es la normativa INVIAS, la cual está basada en la normatividad internacional de la ASTM, por lo cual los ensayos son de ámbito internacional. La maquinaria e instrumentos utilizados para la



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



realización de estos ensayos se encontraban en laboratorio de hormigón “Barrios Padilla SAS” ubicado en el conjunto residencial los Tamarindos en la ciudad de Cartagena de Indias.

5.7.1. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto para pavimentos.

Esta Prueba se basa en la metodología plasmada en la norma colombiana INV E-410 que se titula “*Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.*” La cual es un ajuste de la norma internacional ASTM C39M-12 titulada “*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”; el objetivo principal de esta norma es contemplar el procedimiento por el cual se determina la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tanto para los moldeados como para los de núcleo extraído, que en este caso fueron moldeados.

Los resultados de este ensayo se usan como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación del concreto; para verificar el cumplimiento de especificaciones; evaluar la efectividad de los aditivos, y para otros usos similares. El ensayo consistió en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, con una velocidad de carga prescrita, hasta que se presentó la falla. La resistencia a la compresión se determinó dividiendo la máxima carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal del espécimen. Los cilindros ensayados estaban preparados bajos las condiciones de la norma INV E-402.



Ilustración 16. Medición de la resistencia a compresión del cilindro de concreto en la prensa hidráulica.



Fuente: Autores

5.7.2. Ensayo de tracción indirecta sobre cilindros de concreto para pavimento.

Este ensayo se basa en la metodología plasmada en la norma Colombiana INVIAS-411-13 que se titula “*Ensayo de tracción por hendimiento (tracción indirecta) de cilindros de concreto.*” La cual es un ajuste de la norma internacional ASTM C496M-11 titulada “*Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”; el objetivo principal de esta norma es contemplar el procedimiento por el cual se determina la tracción por hendimiento o la resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos en concreto, esta normativa plantea que puede ser aplicada tanto en cilindros moldeados como en cilindros extraídos (INVIAS, 2016), en este caso se utilizan moldeados.

El ensayo consistió en aplicar una fuerza diametral compresiva a lo largo de la longitud del espécimen cilíndrico de concreto a una velocidad específica, hasta que ocurrió una falla que dividió el cilindro en dos partes geométricas muy semejantes. Este sistema de carga indujo a esfuerzos de compresión considerables en el área aferente y a fallas netamente por tensión y



no por compresión, ya que la metodología para su realización así lo permite. Este montaje consistió de una máquina de ensayo que se ajustó a los requerimientos INV E-410, unas platinas suplementarias de apoyo y unos listones de apoyos; siendo esta la configuración del cilindro:

Ilustración 17. Cilindro de concreto en el montaje necesario para el ensayo de tracción indirecta.



Fuente: Autores

Al proceder con la realización del ensayo se tuvieron en cuenta características como: la carga máxima indicada por la máquina de ensayo, la longitud y el diámetro del cilindro. Se utilizó la fórmula para hallar la resistencia a la tracción por hendimiento propuesta por la INV E-411:

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

Donde T es la resistencia a la tracción por hendimiento en MPa, P es la carga máxima que resistió el espécimen en N; L y d son la longitud y el diámetro del cilindro respectivamente en mm.(INVIAS, 2016)



5.7.3. Resistencia a flexión del concreto para pavimentos.

Esta prueba se basa en la metodología plasmada en la norma Colombiana INV E-415 que se titula “*Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada cargada en el punto central.*” La cual es un ajuste de la norma internacional ASTM C293M-10 titulada “*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*”; el objetivo principal de esta norma es contemplar el procedimiento por el cual se determina la resistencia a la flexión del concreto empleando una viga simplemente apoyada cargada en el punto central, por tanto, permitió hallar el módulo de rotura de los especímenes preparados y curados.(INVIAS, 2016)

Los ensayos de flexión se realizaron tan pronto como fue posible luego de la remoción de los especímenes del sitio de curado, ya que según la ASTM el secado de la superficie del espécimen se traduce en una reducción de la resistencia a flexión medida. Los especímenes cumplieron con las características descritas en el artículo INV E-420 y la máquina del ensayo con las especificaciones de INV E-414, esta fue capaz de aplicar cargas uniformes sin sacudidas o interrupciones.

Ilustración 18. Montaje necesario para la realización del ensayo a flexión con la vigueta flexionada.



Fuente: Autores.



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



Al espécimen tipo vigueta se le aplicó una carga incremental en el centro de la luz, donde la carga máxima aplicada varió entre el 3% y 6% de la carga última del concreto. Para determinar el módulo de rotura de la vigueta de concreto se tuvo en cuenta la siguiente fórmula propuesta por la misma norma:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

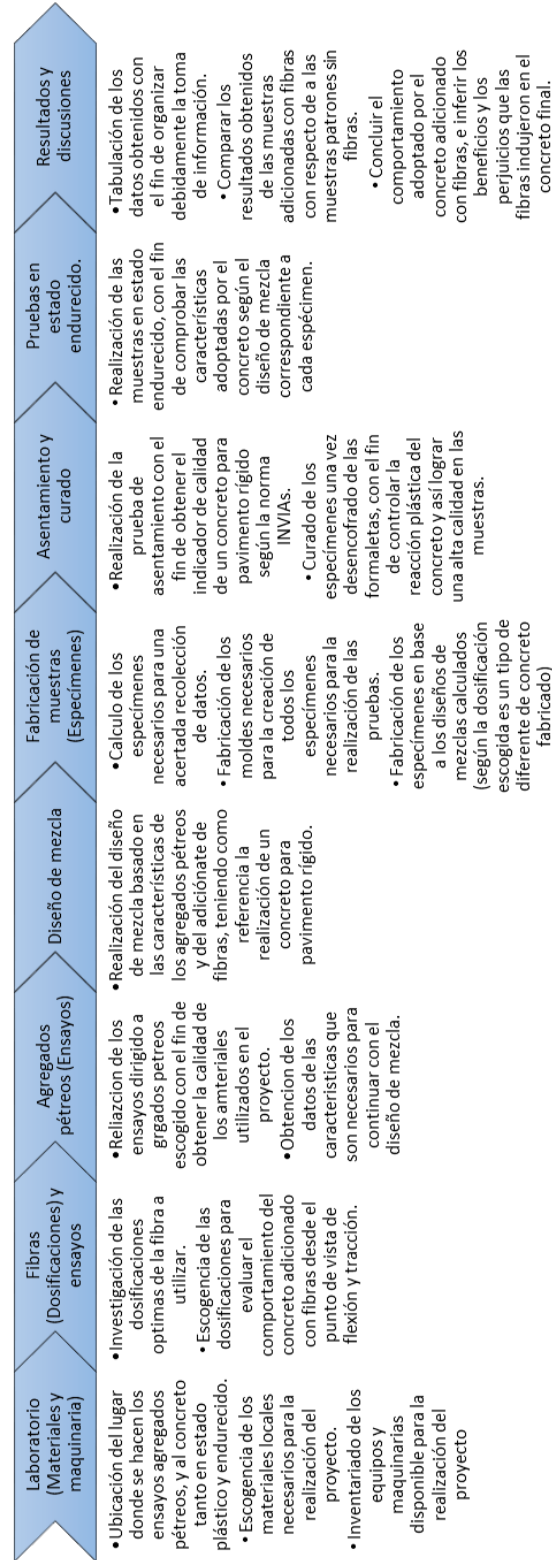
Donde R es el módulo de rotura (MPa), P es la carga máxima aplicada por la máquina de ensayo (N), L es la luz libre entre los dos apoyos (mm), b es el ancho promedio del espécimen del sitio de fractura (mm), y d es la altura promedio del mismo (mm).(INVIAS, 2016)



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



Representación esquemática de la metodología.





6. Resultados y discusión

6.1. Ensayos en los agregados pétreos locales

La calidad de los agregados pétreos locales fue evaluada con base a los resultados obtenidos de su caracterización, esto se hizo a la luz de la norma INVIAS; la cual es la normatividad vigente en el territorio colombiano. Se utilizó el artículo 500 INVIAS, donde se establecen parámetros y características que se tienen en cuenta en la fabricación y elaboración del concreto para pavimentos, así como la calidad y requisitos que deben cumplir los componentes que se usan en el mismo.

6.1.1. Granulometría

El ensayo granulométrico para el agregado fino se realizó con una muestra seca cuyo peso fue de 586.3 g. Luego de realizar el procedimiento descrito en el inciso 5.3.1 se obtuvieron los datos registrados en la tabla 10, en esta se pueden observar los porcentajes de material que pasan por los diferentes tamices y los valores correspondientes a los porcentajes admisibles según la norma INVIAS (estos valores se encuentran en la última columna de la tabla).

Tabla 10. Resultados obtenidos del proceso de tamizado del agregado fino.

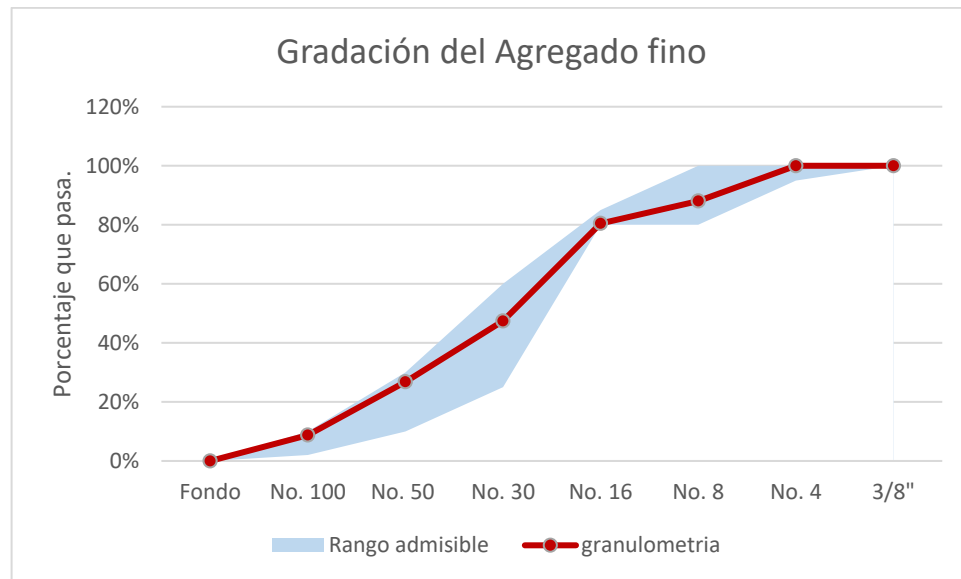
Tamiz	Apertura (mm)	P retenido	Retenido	Acumulado	Pasa	INVIAS
3/8"	9.500	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%
No. 4	4.750	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	95%-100%
No. 8	2.360	70.00	11.94%	11.94%	88.06%	80%-100%
No. 16	1.180	44.56	7.60%	19.54%	80.46%	80%-85%
No. 30	0.600	193.74	33.04%	52.58%	47.42%	25%-60%
No. 50	0.300	120.90	20.62%	73.20%	26.80%	10%-30%
No. 100	0.150	105.74	18.04%	91.24%	8.76%	2%-10%
fondo	0.000	51.36	8.76%	100.00%	-	

Fuente: Autores.



Según la *Tabla 10* se puede ver que el agregado fino cumple con el requisito granulométrico propuesto por INVIAS, debido a que los porcentajes que pasan por cada tamiz se encuentran en el rango admisible de esta norma. En la gráfica. 1 se observa la curva de gradación de los resultados obtenidos para la granulometría del agregado fino.

Gráfica. 1. Gradación del agregado fino dentro del rango propuesto por INVIAS.



Fuente: Autores.

El ensayo granulométrico para el agregado Grueso se realizó con una muestra seca que pesó 5110.3 g. Luego de realizar el procedimiento descrito en el inciso 5.3.1 se obtuvieron los resultados consignados en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Resultados obtenidos del tamizado del agregado grueso.

tamiz	Abertura (mm)	P retenido	Retenido	Ret. ACUM	Pasa	AG 1 - Fra. 2	AG 2 - Fra. 2
1 - 1/2"	37.900	0	0%	0%	100%	100	-
1"	25.400	0	0.00%	0.00%	100%	95 - 100	100
3/4"	19.000	438.9	8.59%	8.59%	91.41%	-	90 - 100
1/2"	12.500	2810.9	55.00%	63.59%	36.41%	25 - 60	-
3/8"	9.500	834.2	16.32%	79.92%	20.08%	-	20 - 50
No. 4	4.750	959.4	18.77%	98.69%	1.31%	0 - 10	0 - 10

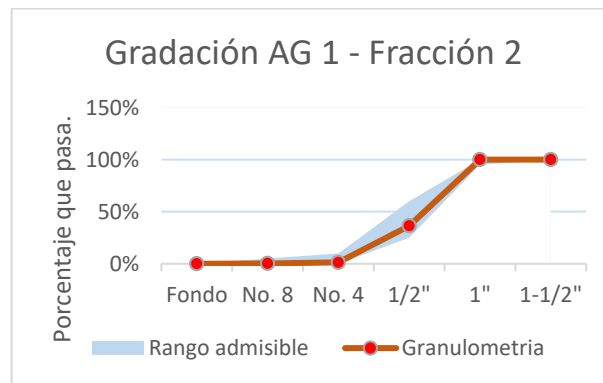


No. 8	2.360	51.9	1.02%	99.71%	0.29%	0 - 5	0 - 5
fondo	-	15	0.29%	-	-		

Fuente: Autores.

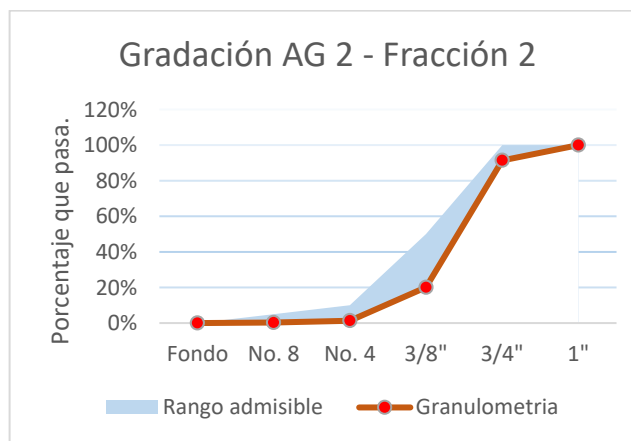
En la tabla anterior se observa que el agregado grueso se ajusta a dos gradaciones distintas de la *Tabla 11*, cumpliendo así con los requisitos de la norma INVIAS. A su vez se observa en las gráficas 2 y 3 la curva granulométrica del agregado para las dos gradaciones, según lo cual el porcentaje que pasa de material se encuentra en los rangos admisibles según la norma.

Gráfica. 2. Gradación del agregado Grueso dentro del rango AG1–Frac.2 propuesto por INVIAS.



Fuente: Autores.

Gráfica. 3. Gradación del agregado Grueso dentro del rango AG2–Frac.2 propuesto por INVIAS.



Fuente: Autores.



6.1.2. Densidad, Densidad relativa y absorción del agregado fino.

Para hallar la densidad seca, la densidad saturada superficialmente seca, la densidad aparente y la absorción del agregado fino se procedió según la metodología plasmada en el inciso 5.3.4.

Al realizar el ensayo experimental se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 12. Datos obtenidos durante la realización del experimento en campo para la arena.

Datos	
Masa Picnómetro lleno de agua. (B)	685.6 G
Masa Picnómetro con muestra lleno de agua. (C)	998.7 G
Masa de la muestra en condición saturada. (S)	505.2 G
Masa de la muestra seca al horno. (A)	492.6 G

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos en la *tabla 12*, se realizaron los cálculos necesarios para hallar las densidades de la arena:

Tabla 13. Resultados obtenidos del desarrollo de la metodología planteada para la arena.

Resultados	
Densidad seca	2557.31 Kg/m ³
Densidad saturada superficialmente seca	2623.88 Kg/m ³
Densidad aparente	2737.43 Kg/m ³

Fuente: Autores.

Una vez halladas las densidades se procedió a calcular la absorción, con el fin de verificar si la arena cumple con los requerimientos propuestos por la norma INVIAS; según la cual la absorción debe ser máximo 4%. El valor obtenido de absorción para la arena fue de 2.56%, por lo que se puede decir que cumple con el requisito de calidad ya que se encuentra por debajo del límite (este requisito se puede ver en la *Tabla 2*).



6.1.3. Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso.

Para hallar la densidad seca, la densidad saturada superficialmente seca, la densidad aparente y la absorción del agregado grueso, se procedió según la metodología plasmada en el inciso 5.3.5. Se realizó el ensayo experimental y se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 14. Datos obtenidos durante la realización del experimento en campo para la grava.

Datos	
Masa secada al horno (A)	3048.20 g
Masa saturada superficialmente seca (B)	3096.97 g
Masa aparente sumergida en agua (C)	1923.47 g

Fuente: Autores.

Con los datos consignados en la *tabla 14* se realizaron los cálculos necesarios para hallar las densidades del agregado grueso de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ "in:

Tabla 15. Resultados obtenidos del desarrollo de la metodología planteada para la grava.

Resultados	
Densidad seca	2590.32 Kg/m ³
Densidad saturada superficialmente seca	2630.87 Kg/m ³
Densidad aparente	2710.11 Kg/m ³

Fuente: Autores.

Una vez halladas las densidades se procedió a calcular la absorción con el fin de saber si la arena cumple con los requisitos propuestos por la norma INVIAS. La absorción obtenida para la arena es de 1.60%, valor que se encuentra por debajo del límite de 4% que exige la norma (ver la tabla 3).

6.1.4. Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos

La densidad Bulk y el porcentaje de vacíos son unos parámetros muy importantes en el diseño de mezclas de concreto; por tanto, fue necesario para los objetivos del proyecto su cálculo,



esto se hizo siguiendo los lineamientos del inciso 5.3.2. Los datos utilizados para hallar estos valores del agregado grueso son:

Tabla 16. Variables obtenidas en la realización de la prueba de peso bulk y absorción.

Datos	
Masa del recipiente (T)	2546 g
Altura del recipiente (h)	15.45 cm
Ancho del recipiente (D)	15.00 cm
Volumen nominal del recipiente (V)	0.0027 m ³
Masa del recipiente + muestra compactada (G)	7100 g

Fuente: Autores.

Con estos datos y la densidad seca obtenida en el inciso, se realizó el cálculo para hallar la densidad bulk y el porcentaje de vacíos:

Tabla 17. Resultados obtenidos en la realización de la prueba de peso bulk y absorción

Resultados	
Densidad Bulk	1667.99 Kg/m ³
Porcentaje de vacíos	35.60%

Fuente: Autores.

6.1.5. Resistencia al desgaste por medio de la máquina de los ángeles.

Se realizó el procedimiento descrito en el ítem 5.3.3, y según lo cual se obtuvo un porcentaje de desgaste igual a 23,71%, como se observa a continuación:

Tabla 18. Porcentaje de la resistencia la gradación del agregado grueso.

Resultados	
Masa inicial de la muestra seca (P1)	5002 g
Masa de la muestra previamente desgastada, lavada y secada (P2)	3816 g
% Desgaste	23.71%

Fuente: Autores.



Con respecto a este valor de desgaste se puede decir que el agregado cumple con el requerimiento descrito por la norma INVIAS en la tabla 3, según la cual el porcentaje máximo de desgaste debe ser 40%.

6.1.6. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados

Se realizó el procedimiento descrito en el ítem 5.3.6, y según lo cual se obtuvieron los resultados que se observan a continuación:

Tabla 19. Resultados de los porcentajes de arcillas y partículas deleznable de los materiales, tanto para fino como para grueso.

	Agregado grueso	Agregado fino
Masa de la muestra de ensayo (M)	2040 g	72.7 g
Masa de la muestra de ensayo (R)	2025.924 g	71 g
Porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable (P %)	0.69 %	2.39 %

Fuente: Autores.

Se puede decir que el agregado grueso y fino cumple con el requerimiento descrito por la norma INVIAS en la tabla 2 y 3, según la cual el porcentaje máximo de terrones de arcilla y partículas deleznable debe ser 3%.

6.1.7. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

Se realizó el procedimiento descrito en el ítem 5.3.7, según lo cual se obtuvieron los resultados que se observan a continuación:

Tabla 20. Resultados del porcentaje de cara fracturada del agregado grueso.

Resultados	
Masa de partículas fracturadas (F)	1424 g



Masa de las partículas en la categoría de no fracturadas (N)	66 g
Porcentaje de caras fracturadas (P%)	95.57

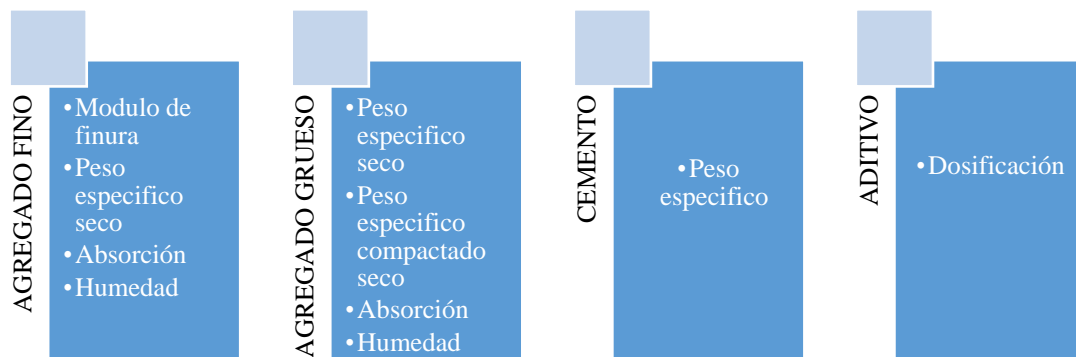
Fuente: Autores.

Se puede decir que el agregado grueso cumple con el requerimiento descrito por la norma INVIAS en la tabla 3, según la cual el porcentaje mínimo de partículas debe ser 60%.

6.2. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla fue proporcionado por la empresa Ingueto y Cia Ltda, a continuación, se describe como se realizó. Para realizar el diseño de mezcla fue primordial tener en cuenta los materiales y las características descritas a continuación en la *tabla 21*:

Tabla 21. Materiales utilizados en la fabricación del concreto diseñado.



Fuente: Autores.

6.2.1. Asentamiento

De acuerdo con la tabla 22, para los pavimentos y las losas el asentamiento debe estar entre 1 y 3 pulgadas; pero como se trabajará con un concreto adicionado con fibras se escoge el asentamiento máximo que corresponde a 3", con el objetivo de que la mezcla no pierda fluidez al estas ser adicionadas.



Tabla 22. Valores de asentamiento según tipo de construcción

Tipos de construcción	Asentamiento, in	
	Máximo +	Mínimo
Muros y cimientos reforzados	3	1
Zapatas planas, cajones y paredes de subestructura	3	1
Vigas y muros reforzados	4	1
Columnas estructurales	4	1
Pavimentos y losas	3	1
Hormigón en masa	2	1

Fuente: (Dixon et al., 2002)

6.2.2. Volumen de agua

Para escoger el volumen de agua se entró a la tabla 23 y se seleccionó el tamaño máximo del agregado con el cual se está trabajando, que en este caso corresponde a $\frac{3}{4}$ ", y se seleccionó el concreto sin aire incorporado por no existir ciclos de hielo y deshielo en la zona Caribe, y a su vez se tuvo en cuenta el asentamiento correspondiente a 3" escogido en el paso anterior. Según esto se obtiene una cantidad de agua preliminar de 340 lb/yd^3 (201.7 kg/m^3) que más adelante se corrige con la absorción, humedad y volumen de los agregados.

Tabla 23. Valores de tamaño máximo nominal según el tipo de construcción.

Agua (lb/yd ³) en el concreto para los tamaños máximos de agregados indicado								
Asentamiento (In)	3/8 in	1/2 in	3/4 in	1 in	1 1/2 in	2 in	3 in	6 in
Concreto sin aire incorporado								
1 a 2	350	335	315	300	275	260	220	190
3 a 4	385	365	340	325	300	285	245	210
6 a 7	410	385	360	340	315	300	270	-
más de 7	-	-	-	-	-	-	-	-
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire. Porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto incorporado con aire								
1 a 2	305	295	280	270	250	240	205	180



3 a 4	340	325	305	295	275	265	225	200
6 a 7	365	345	325	310	290	280	260	-
más de 7	-	-	-	-	-	-	-	-
Promedio recomendados de contenidos de aire, porcentajes por nivel de exposición:								
Exposición leve	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Fuente: (Dixon et al., 2002)

6.2.3. Relación agua cemento

Este es uno de los parámetros más importantes en el diseño de mezcla, porque de él depende el comportamiento y desempeño general del concreto, tales como la resistencia, la durabilidad, la permeabilidad y el acabado. Esta relación agua cemento se tomó según la tabla 24; debido a que requerimos un concreto de alto desempeño con alta capacidad portante en el pavimento, se planteó necesario un diseño de mezcla para un concreto de 5000 PSI, con el objetivo de obtener un comportamiento idóneo de un concreto hidráulico que se usa en vías, que según la tabla mencionada es ideal una relación de 0.48 según la ACI 211-1-91.

Tabla 24. Relación entre la resistencia a la compresión y valores de la relación a/c.

Esfuerzo a compresión a los 28 días, PSI	Relación agua cemento, por peso	
	Concreto sin incorporar aire	Concreto incorporado con aire
6000	0.41	-
5000	0.48	0.40
4000	0.57	0.48
3000	0.68	0.59
2000	0.82	0.74

Fuente: (Dixon et al., 2002)

Sin embargo la relación de agua cemento escogido se tuvo que corregir teniendo en cuenta el ambiente o clima el cual estará cometido nuestro concreto, teniendo en cuenta la zona real en la cual se realizó la investigación, se escogió una estructura expuesta a aguas de mar o



sulfatos, que es una condición muy típica en la costa caribe colombiana, por tanto según tabla 25, la relación agua cemento debe de ser corregido teniendo en cuenta el factor que postula que necesariamente tiene que ser mayor a 0.45, sin embargo, debido a la utilización de plastificantes y mejoramiento de la manejabilidad se optó por escoger una relación de agua y cemento de 0.45

Tabla 25. Recomendaciones para relación a/c.

Tipos de estructura	Estructura continua y frecuentemente sumergida y expuestas a congelamiento y deshielo.	Estructuras expuestas a agua de mar o sulfatos.
Secciones delgadas (barandas, bordillos, alfeizares, repisas, trabajos ornamentales) u secciones con menos de 1 in de recubrimiento.	0.45	0.40+
Otras estructuras.	0.50	0.45+

Fuente: (Dixon et al., 2002)

6.2.4. Contenido de cemento

Una vez hallada la cantidad de agua y la relación a/c por peso, se obtiene una cantidad de cemento que es corresponde a 448,25 kg/m³, que equivale a un volumen de 0,142 m³ de cemento.

6.2.5. Agregados pétreos

6.2.5.1. Análisis granulométrico

Antes de continuar con la obtención de los volúmenes de agregados pétreos dentro del concreto, fue necesario verificar la calidad de los mismos, debido a que en el numeral A.5.3.2 de la ACI 211-1-91 índico que los agregados utilizados debían cumplir con los requerimientos de calidad gravimétrica de norma ASTM C33.



6.2.5.1.1. Agregado Grueso

La norma ASTM C33 plantea una variedad de gradaciones para agregado grueso que van acorde a una amplia gama de tipos de suelos. El agregado escogido está dentro del rango de tamaño $\frac{3}{4}$ y No 8, por lo tanto, se escogen como gradaciones de evaluación de calidad las 6 y 67 presentadas en la norma, descritas en la tabla 26.

Tabla 26. Porcentaje de masa que pasa que se ajustan a las gradaciones mencionadas.

Gradación	Tamaños nominales	Porcentajes que pasa requeridos.					
		1 in	3/4 in	1/2 in	3/8 in	No 4	No 8
6	3/4 a 3/8 in	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	0 - 5	-
67	3/4 in a No 4	100	90 - 100	-	20 - 55	0 - 10	0 - 5

Fuente: (Yoneyama, et al., 2015)

Luego se procedió a valorar la granulometría que presentó el agregado con los requerimientos en la norma ASTM C33, como se muestra en la tabla 27 y en los gráficos 4 y 5.

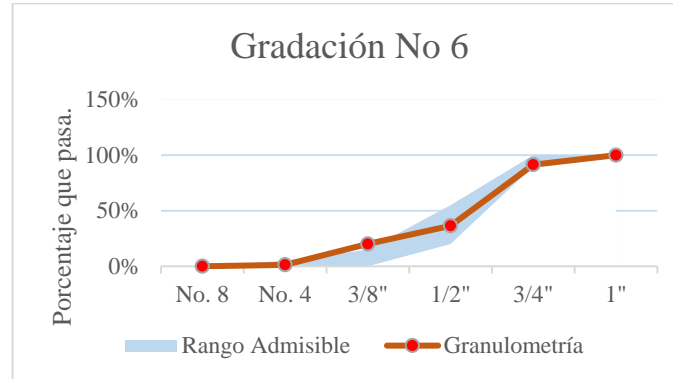
Tabla 27. Comparación de las gradaciones 6 y 67 de la norma con la granulometría obtenida en laboratorio.

Requerimientos ASTM C33		Granulometría del material 3/4		
Gradación 6	Gradación 67	tamiz	Abertura (mm)	% Pasa
100	100	1"	25.4	100
90 - 100	90 - 100	3/4"	19.0	91.41
20 - 55	-	1/2"	12.5	36.4
0 - 15	20 - 55	3/8"	9.5	20.08
0 - 5	0 - 10	No. 4	4.75	1.3
-	0 - 5	No. 8	2.36	0.29

Fuente: Autores.

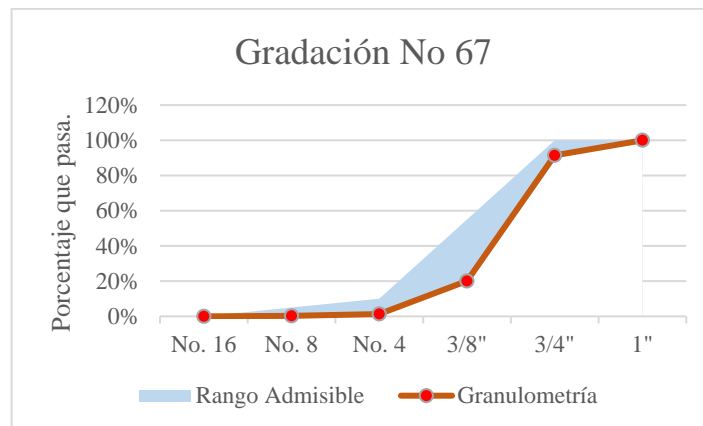


Gráfica. 4. Comparación de la gradación 6 de la norma ASTM C33 con la granulometría obtenida en laboratorio.



Fuente: Autores

Gráfica. 5. Comparación de la gradación 67 de la norma ASTM C33 con la granulometría obtenida en laboratorio.



Fuente: Autores

El agregado cumplió con las exigencias de calidad gravimétrica de norma, debido a que se ajusta dentro del rango admisible de la gradación No 67, por tanto, es apto para ser empleado en los cálculos del diseño de mezcla según la norma ACI 211.



6.2.5.1.2. Agregado fino.

La norma ASTM C33 hace énfasis en la calidad del agregado fino, ya que este material tiene un comportamiento importante dentro de la pasta de concreto, por esto la norma mencionada comprende requisitos necesarios que debió cumplir el material para ser apto en su utilización en la fabricación del concreto, uno de estos es la gradación necesaria del agregado fino, que esta descrita en la tabla 28.

Tabla 28. Porcentaje de masa que pasa requeridas para él fino propuesta por la norma.

Tamiz		Porcentaje que pasa
3/8 in	(9.5 mm)	100
No 4	(4.75 mm)	95 - 100
No 8	(2.36 mm)	80 - 100
No 16	(1.18 mm)	50 - 85
No 30	(600 μ m)	25 - 60
No 50	(300 μ m)	5 - 30
No 100	(150 μ m)	0 - 10

Fuente: (Dixon et al., 2002)

Luego se procedió a valorar la granulometría que presentó el agregado fino con los requerimientos en la norma ASTM C33, como se muestra en la tabla 29 y en la gráfica 6.

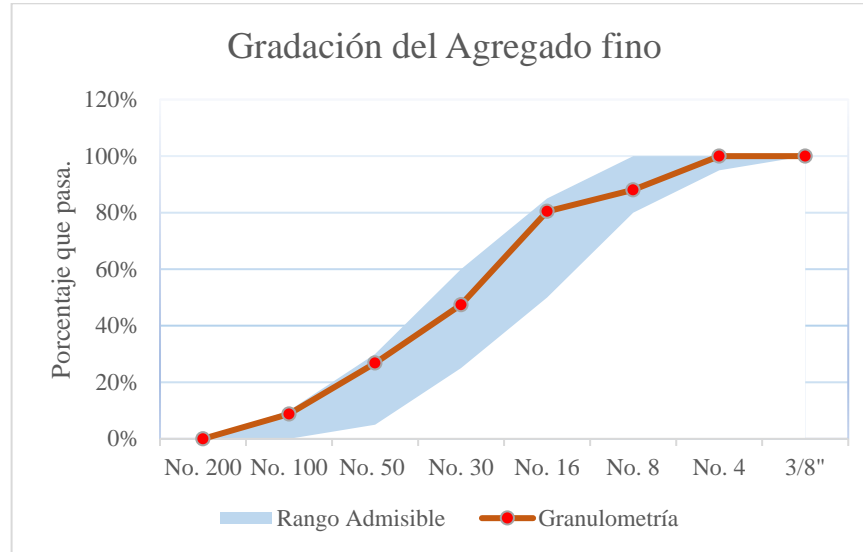
Tabla 29. Comparación de la gradación de la norma ASTM C33 con la granulometría del agregado fino obtenida en laboratorio.

ASTM C33 (%)	Tamiz	Apertura (mm)	% Pasa
100	3/8"	9.5	100.0%
95 – 100	No. 4	4.75	100.0%
80 – 100	No. 8	2.36	88.1%
50 – 85	No. 16	1.18	80.5%
25 – 60	No. 30	0.6	47.4%
5 – 30	No. 50	0.3	26.8%
0 – 10	No. 100	0.15	8.8%

Fuente: Autores



Gráfica. 6. Comparación de la gradación de la norma ASTM C33 con la granulometría del agregado fino obtenida en laboratorio.



Fuente: Autores

El agregado fino cumplió con las exigencias de calidad gravimétrica de la norma debido a que se ajusta dentro del rango admisible de la gradación para material de tamaño inferior a 3/8", por tanto, es apto para ser empleado en los cálculos del diseño de mezcla según la norma ACI 211.

6.2.5.2. Características del agregado pétreo

Una vez se comprobó la calidad gravimétrica del agregado pétreo (Tanto fino como grueso), se procedió a continuar con el diseño de mezcla, sin embargo, para esto se requieren ciertas características del agregado que son indispensables en diferentes cálculos de diseño, dichas propiedades fueron halladas en el momento que se caracterizó el agregado pétreo local para medir su calidad en su utilización para pavimentos. Estas características se encuentran descritas en el ítem 6.1; a continuación, en la tabla 30 están las características de los agregados necesarios para el diseño:



Tabla 30. Características del agregado fino y grueso necesarias para diseñar el concreto para pavimentos.

Características del agregado pétreo			
Agregado grueso		Agregado Fino	
Densidad compactada seca	1667.99 Kg/m ³	Módulo de finura	2.53
Densidad seca	2403.33 Kg/m ³	Densidad seca	2557.31 Kg/m ³
Absorción	1.6 %	Absorción	2.56 %
Humedad	0.57 %	Humedad	3.76 %

Fuente: Autores

6.2.6. Volumen de agregado grueso

Para calcular el volumen del agregado grueso se ingresa a la tabla 31 con el tamaño máximo nominal del agregado con el cual se está trabajando en el proyecto, el cual es de $\frac{3}{4}$ " , y con el módulo de finura correspondiente a 2,49; sin embargo, se observa que en dicha tabla no está este último valor, por lo tanto, se requiere hacer una regresión lineal, la cual se muestra es la gráfica 7.

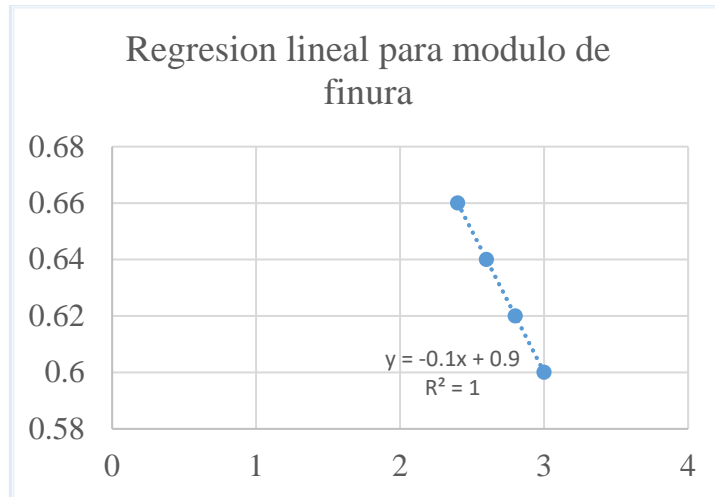
Tabla 31. Volúmenes de agregado grueso por volumen de concreto.

Tamaño máximo nominal del agregado, in	Volumen de agregado grueso por volumen de concreto para diferentes módulos de finura			
	2.4	2.6	2.8	3
$\frac{3}{8}$	0.5	0.48	0.46	0.44
$\frac{1}{2}$	0.59	0.57	0.55	0.53
$\frac{3}{4}$	0.66	0.64	0.62	0.6
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1 $\frac{1}{2}$	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.8	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Autores



Gráfica. 7. Regresión lineal aplicada para hallar el correcto volumen del agregado.



Fuente: Autores

La regresión lineal estima una tendencia del comportamiento para el volumen de los agregados según el módulo de finura, siendo esta:

$$\text{Volumen de agregado grueso} = -0.1 * \text{Modulo de finura} + 0.9$$

De esto se obtiene un volumen de 0,65 yd³ para un diseño de mezcla por unidad de volumen de 1 yd³; sin embargo, este diseño de mezcla está basado en 1 m³, por tanto, la unidad de volumen necesaria de agregado grueso es proporcional a la obtenida en la tabla 31, es decir 0.418 m³.

6.2.7. Volumen para el agregado fino

Se obtiene mediante la diferencia de 1 m³ de concreto del volumen de los otros materiales calculados anteriormente tales como: agregado grueso, agua y cemento.

6.2.8. Proporciones

A continuación, en la tabla 32 se muestran las proporciones finales para 1 m³ utilizadas en la mezcla:



Tabla 32. Volúmenes y pesos de cada uno de los materiales por unidad de volumen de concreto.

Elemento	Volumen Absoluto (m ³)	Peso Específico (kg/m ³)	Peso (kg)
Agua	0.202	1000.00	202.00
Cemento	0.142	3150.00	448.25
Grava (seca)	0.417	2590.00	1080.03
Arena (seca)	0.219	2557.88	544.82
Aire	0.020	0.00	0.00
TOTALES	1.000	-	2275.1

Fuente: Autores.

6.2.9. Ajuste de la cantidad de agua de mezclado debido a la humedad de los agregados

Es necesario hacer un ajuste de humedad a los materiales pétreos debido a que estos no están en una condición totalmente seca y se debe tener en cuenta la humedad que estos pueden aportar a la mezcla. Para calcular la cantidad de agua que pueden absorber se debe restar la absorción menos la humedad y multiplicarse por el volumen del material grueso o fino.

Tabla 33. Correcciones del agua de amasado por humedad y absorción del diseño de mezcla.

Tipo de Agregado	Absorción %	Humedad %	Aporte de agua (1m ³)
Fino	2.56	3.76	- 0.002
Grueso	1.6	0.57	+ 0.004
			+ 0.002

Fuente: Autores.

Luego se suma la cantidad de agua aportada por los agregados gruesos y finos a la calculada anteriormente, obteniéndose 0.204 m³.

A continuación, se observa la tabla con la corrección del agua:



Tabla 34. Volúmenes y pesos de cada uno de los materiales por unidad de volumen de concreto corregidos.

Elemento	Volumen Absoluto (m ³)	Peso Específico (kg/m ³)	Peso (kg)
Agua	0.204	1000.00	204.00
Cemento	0.142	3150.00	448.25
Grava (seca)	0.417	2590.00	1080.03
Arena (seca)	0.219	2557.88	544.82
Aire	0.020	0.00	0.00

Fuente: Autores.

6.2.10. Adicionales en el concreto.

Una vez obtenidos los volúmenes que componen el diseño de mezcla se tuvo en cuenta la adición del plastificante Sika Viscocrete 2100 con el fin de mejorar la manejabilidad del concreto en estado fresco adicionado con fibra, ya que se espera que la incorporación de estas afecte desfavorablemente la fluidez del concreto. Para esto se tuvo en cuenta el rango de dosificaciones del plastificante recomendado por el fabricante, que va de 0.003 a 0.008, cabe resaltar que el aditivo solo fue utilizado en las mezclas con fibras, ya que se esperó que la muestra patrón tuviera una manejabilidad normal según su diseño.

Finalmente se obtuvieron 4 diseños de mezclas en donde se incluía en ellos dosificaciones diferentes de fibras y de aditivo plastificante; los porcentajes utilizados fueron los siguientes:

Tabla 35. Proporciones de Aditivo para cada tipo de mezcla de concreto adicionada con fibras.

Concreto	Cantidad de Fibras por m ³ de concreto	Dosificación de aditivo en % de masa de cemento
CSF	0 Kg	0 %
CCF-6KG	6 Kg	0.60 %
CCF-12KG	12 Kg	0.62 %
CCF-18KG	18 Kg	0.65 %

Fuente: Autores.



6.2.11. Proporciones finales

En cada diseño de mezcla existe un porcentaje diferente en la cantidad de material empleado para la fabricación de concreto, debido a que en todos ellos hay una desigualdad en la cuantía de los elementos utilizados:

Tabla 36. Proporciones finales del diseño de mezcla CSF para 1 m³ de concreto.

Material	Cemento	Agua	Arena	Grava	Fibras	Aditivo
kg	448.25	204.00	544.82	1080.03	0	0
Descripción	General Cemex	-	Material fino	3/4	Polimérica Tuf-Strand SF	Sika Viscocrete 21 00 (Plastificante)
Porcentajes	19.69%	8.96%	23.93%	47.43%	0.00%	0.00%

Tabla 37. Proporciones finales del diseño de mezcla CCF-6KG para 1 m³ de concreto.

Material	Cemento	Agua	Arena	Grava	Fibras	Aditivo
kg	448.25	204.00	544.82	1080.03	6.00	2.69
Descripción	General Cemex	-	Material fino	3/4	Polimérica Tuf-Strand SF	Sika Viscocrete 21 00 (Plastificante)
Porcentajes	19.61%	8.92%	23.84%	47.25%	0.26%	0.12%

Tabla 38. Proporciones finales del diseño de mezcla CCF-12KG para 1 m³ de concreto.

Material	Cemento	Agua	Arena	Grava	Fibras	Aditivo
kg	448.25	204.00	544.82	1080.03	12.00	2.78
Descripción	General Cemex	-	Material fino	3/4	Polimérica Tuf-Strand SF	Sika Viscocrete 21 00 (Plastificante)
Porcentajes	19.56%	8.99%	23.77%	47.12%	0.52%	0.12%



Tabla 39. Proporciones finales del diseño de mezcla CCF-18KG para 1 m³ de concreto.

Material	Cemento	Agua	Arena	Grava	Fibras	Aditivo
kg	448.25	204.00	544.82	1080.03	18.00	2.91
Descripción	General Cemex	-	Material fino	3/4	Polimérica Tuf-Strand SF	Sika Viscocrete 21 00 (Plastificante)
Porcentajes	19.51%	8.88%	23.71%	47.00%	0.78%	0.13%

Fuente: Autores.

6.3. Asentamiento

A todas las mezclas de concreto se les realizó el ensayo del cono descrito en el inciso 5.6., el cual consiste en medir el asentamiento (característica que permite deducir el comportamiento mecánico en estado fresco del concreto) con el objetivo de conocer la consistencia y manejabilidad de la mezcla. Los asentamientos obtenidos según el tipo de dosificación de fibras en el concreto fueron los siguientes:

Tabla 40. Asentamiento obtenido para cada uno de los concretos. .

Concreto	Asentamiento (cm)
CSF	6.00
CCF-6KG	5.30
CCF-12KG	4.60
CCF-18KG	5.00

Fuente: Autores.

Se observó que en los concretos con fibras el asentamiento disminuyó debido a la inclusión de un nuevo tipo de material en la matriz de concreto, sin embargo, esto se contrarrestó con el uso de plastificante, el cual le aportó mejor manejabilidad y consistencia a la mezcla con el objetivo de realizar una correcta colocación y compactación en los moldes. Cabe resaltar que se incrementó la cantidad de aditivo a medida que aumentaba la dosificación de fibras, sin embargo, se procuró agregar la dosis óptima de este para evitar la segregación.



6.4. Ensayos en el concreto en estado endurecido.

Para el correcto desarrollo del proyecto se ensayaron todos los especímenes de concreto en estado endurecido, esto se hizo con el fin de conocer como incide el uso de las fibras sintéticas de polipropileno y polietileno en las propiedades mecánicas del mismo; teniendo en cuenta que el objetivo principal del proyecto está orientado a conocer la variación y comportamiento del concreto adicionado con fibras en términos de flexión con respecto a una muestra patrón. Los ensayos que se realizaron son: la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y a la tracción indirecta; estos ensayos se hicieron a la luz de las normas colombianas que controlan los ensayos sobre el concreto para pavimentos propuesto por el ministerio de vías y transportes de Colombia, normativa INVIAS, la cual a su vez está basada en la normatividad internacional de la ASTM.

6.4.1. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto para pavimentos

Se procedió a realizar este ensayo según la metodología plasmada en el inciso 5.7.1. A continuación, en la *tabla 41* se observan los resultados a compresión para las muestras sin fibras a los 7, 14 y 28 días, con el fin de obtener la curva de resistencia versus edad:

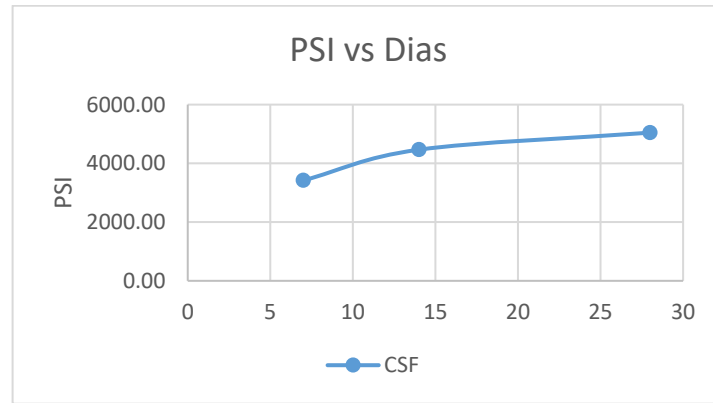
Tabla 41. Resistencia a la compresión de CSF según varias edades.

Compresión CCF			
Días	Carga (KN)	Mpa	Psi
7	191.09	23.57	3419.51
14	249.53	30.78	4465.36
28	281.97	34.78	5045.85

Fuente: Autores.



Gráfica. 8. Curva de la resistencia a la compresión del concreto CSF según su edad.



Fuente: Autores.

Según los resultados obtenidos en la tabla 41 y en la gráfica 8, se observa un aumento en la resistencia a la compresión del concreto a mayores edades, obteniéndose de esta manera un valor de 5045,85 PSI los 28 días; por lo que se puede decir que es aceptado el hormigón ya que cumple el requisito mínimo de resistencia para el cual fue diseñado que es 5000 PSI a los 28 días, por lo tanto se deduce que el diseño de mezcla resultó satisfactorio debido a que se logra el objetivo de la resistencia a la compresión.

En la tabla 41 se observan los valores obtenidos para la resistencia a la compresión a los 28 días de las muestras con las diferentes dosificaciones de fibras, y en la última columna de la tabla se observa el porcentaje de aumento de la resistencia del concreto para cada dosificación de fibra escogida con respecto a la muestra patrón (la cual no contiene fibras):

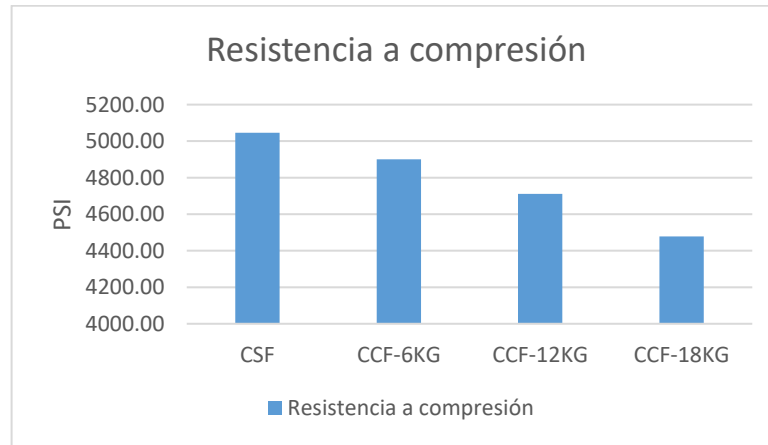
Tabla 42. Resistencia al accompresion de los concretos adicionados con fibras teniendo como referencia la muestra patron(concreto sin fibra)

Compresión 28 días				
Concreto	Carga (KN)	(Mpa)	(Psi)	%
CSF	281.97	34.78	5045.85	0.00%
CCF-6KG	273.85	33.78	4900.57	-2.88%
CCF-12KG	263.28	32.47	4711.41	-6.63%
CCF-18KG	250.26	30.87	4478.39	-11.25%

Fuente: Autores.



Gráfica. 9. Resistencia a la compresión de todos los concretos diseñados.



Fuente: Autores.

Con respecto a los resultados obtenidos a los 28 días para las muestras adicionadas con fibras, se obtuvo una disminución de la resistencia a la compresión del 2,82%, 6,63% y 11,25% respectivamente para las dosificaciones de fibras de 6 Kg/m³, 12Kg/m³ y 18 Kg/m³ con respecto a la muestra patrón. En la gráfica 9 se observa de forma ilustrativa más claramente la disminución de la resistencia a la compresión del concreto a medida que se aumenta el porcentaje de fibras en la mezcla, esto se debe a que la dispersión de estas en la matriz del concreto genera confinamiento y puede causar porosidad; por lo cual no se recomienda emplear dosis muy elevadas de fibras debido a que puede afectar la resistencia a compresión; tal como lo demuestra y lo sugiere el estudio “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles” (Acero, 2017), donde demuestra que el contenido de fibras en la matriz del concreto disminuye la resistencia a compresión a medida que se tiene mayor cantidad de fibras; y esta disminución es mayor a medida que aumenta el contenido de fibra sintética.

6.4.2. Ensayo de tracción indirecta sobre cilindros de concreto para pavimento.

Los ensayos de tracción indirecta (también conocido como ensayo de tracción por el método brasileño) fueron realizados siguiendo los lineamientos descritos en el inciso 5.7.2., donde se obtuvo una carga de falla para los especímenes sin fibra y los adicionados con las



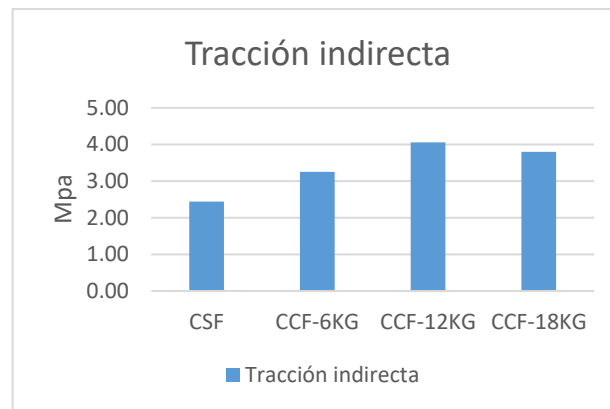
diferentes dosificaciones. En la *tabla 43* se pueden observar los valores obtenidos para el concreto luego del ensayo de tracción indirecta, a su vez se observa en la última columna de la tabla el aumento porcentual de la resistencia que se obtuvo para cada muestra adicionada con fibras con respecto a la muestra patrón:

Tabla 43. Resultados del ensayo de tracción indirecta en todos los especímenes de los diseños de mezclas.

Tracción indirecta				
Concreto	Carga (KN)	(Mpa)	(Psi)	%
CSF	93.83	2.89	419.76	0.00%
CCF-6KG	105.47	3.25	471.83	12.41%
CCF-12KG	131.57	4.06	588.59	40.22%
CCF-18KG	123.17	3.80	551.01	31.27%

Fuente: Autores.

Gráfica. 10. Comparación de los resultados de tracción indirecta de los diseños de mezclas.



Fuente: Autores.

Con respecto a los resultados obtenidos a los 28 días para las muestras adicionadas con fibras, se obtuvo un aumento de la resistencia a la tracción indirecta del 12,41%, 40,22% y 31,27% respectivamente para las dosificaciones de fibras de 6 Kg/m³, 12Kg/m³ y 18 Kg/m³ con respecto a la muestra patrón. En la gráfica 10 se observa más claramente el comportamiento particular que tiene el concreto en este ensayo, en el cual al incrementar la dosificación de fibras dentro de la mezcla aumenta la resistencia a la tracción indirecta; sin embargo este



comportamiento ocurre hasta cierto punto de inflexión en el cual la resistencia empieza a disminuir. Este punto coincide con la dosificación más alta correspondiente a 18 kg/m³, por lo cual se deduce que dosificaciones muy altas de fibras en el concreto pueden generar una dispersión en la matriz del mismo que ocasiona la disminución de la resistencia, por lo cual se recomienda no trabajar con dosificaciones muy altas o por fuera de los límites que recomienda el proveedor debido a que pueden generar pérdida de la resistencia a la tracción indirecta y mayores costos debido a la dosificación excesiva que demanda mayor dinero.

6.4.3. Resistencia a flexión del concreto para pavimentos.

El módulo de rotura es hallado mediante el ensayo de flexo tracción, el cual se realizó siguiendo la metodología propuesta en el inciso 5.7.3. Dicho ensayo es el más determinante al momento de diseñar un pavimento / y medir su resistencia y durabilidad, debido a que este falla mayormente a la flexión por la carga del tráfico, en este orden de ideas el objetivo al momento de diseñar está enfocado en incrementar la resistencia a la flexión más que a la compresión porque la estructura de pavimento difícilmente falla por esto último. De esta forma, el objetivo principal del presente proyecto fue aumentar el módulo de rotura del pavimento desarrollando concretos fibro-reforzados; para lo cual se fabricaron tres viguetas para cada dosificación de fibra y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 44, tal como se observa a continuación:

Tabla 44. Resultados del ensayo a flexion para hallar el modulo de rotura de los especimenes.

Concreto	Carga (KN)	Flexión		
		(Mpa)	(Psi)	Diferencia %
CSF	21.74	4.35	630.73	0.00%
CCF-6KG	23.98	4.80	695.90	10.33%
CCF-12KG	26.72	5.34	775.21	22.91%
CCF-18KG	28.25	5.65	819.70	29.96%

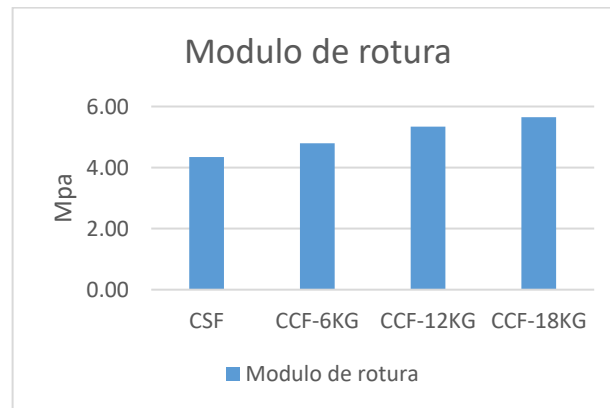
Fuente: Autores.

Según los resultados de la tabla se observa un aumento en el módulo de rotura a medida que se incrementa la cantidad de fibras adicionadas en el concreto, sumado a esto se puede ver



que la diferencia porcentual de los especímenes adicionados con fibras con respecto a la muestra patrón es de 10,33%, 22,91% y 35,74% para las muestras que contenían 6 Kg/m³, 12Kg/m³ y 18 Kg/m³ respectivamente. Según lo anterior, se comprueba que las fibras adicionadas al concreto aumentan el módulo de rotura de este y por lo tanto su resistencia a la flexión; tal como lo demuestran: el estudio “Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles” (Acero, 2017) y el estudio “Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers” (LaHucik Et al, 2017).

Gráfica. 11. Comparación de los resultados obtenidos para el módulo de rotura de las muestras.



Fuente: Autores.

A manera de ilustración, en la gráfica 11 se comprueba una vez más el incremento del módulo de rotura del concreto adicionado con fibras, mejorando así una propiedad mecánica que resulta influyente en el diseño de pavimento rígido, esta propiedad es la resistencia a la flexión.

6.5. Diseño de Pavimento

Para realizar el respectivo diseño de pavimento rígido se utilizará la metodología propuesta por “AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures” (La guía AASHTO para el diseño de estructuras de pavimentos). Es necesario realizar este diseño con el objetivo de comparar en cuanto varían los espesores de la losa de concreto de acuerdo con la utilización de un



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



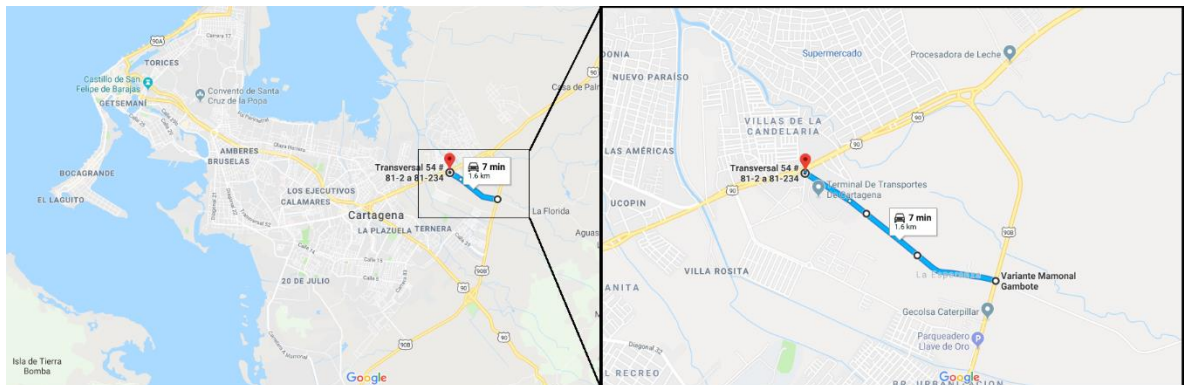
concreto sin ningún tipo de adición y otro adicionado con fibras, para posteriormente evaluar desde el punto de vista económico los pavimentos diseñados por medio de un análisis de precios. Para realizar este diseño se deben determinar ciertos factores que influyen en el mismo, tales como:

6.5.1. Localización y caracterización de la vía

Se diseñó el pavimento rígido de la Vía Campaña, la cual es una vía alterna colectora que tiene una longitud de 1640 m aproximadamente, y se encuentra ubicada entre la intersección con la Carretera de la Cordialidad, junto a la terminal de transportes; y termina en la intersección con la Variante de Cartagena. Al ser una zona inundable se prevé la construcción de obras de drenaje para el control de aguas de escorrentía.

El diseño está orientado a la construcción de un pavimento de doble calzada con ancho de 7 m, integrado por la subrasante estabilizada con cal, subbase y la losa de concreto hidráulico adicionado con fibras sintéticas TUF-STRAND SF y sin fibras.

Ilustración 19. Ubicación de la vía campaña a la cual se le aplicara el diseño de pavimento.



Fuente:

6.5.2. Serviciabilidad

La serviciabilidad es la capacidad que tiene un pavimento de servir al tráfico, esta tiene un valor inicial y uno final.



- El valor para la serviciabilidad inicial (p_0) obtenidos según el AASHTO Road Test fue de 4.5 para pavimento rígido.
- El valor para la serviciabilidad final (p_t) depende del tipo de vía, así como del volumen de tráfico de la misma. De esta manera, esta se escogerá de acuerdo con el mínimo valor tolerado antes de la rehabilitación, repavimentación o reconstrucción; por lo que la AASHTO sugiere un valor de 2.5 o mayor para carreteras principales y 2.0 para carreteras con tráfico menor. En este diseño se tomó un valor de serviciabilidad final de 2.0.

Una vez obtenidos estos valores de serviciabilidad inicial y final se procede a medir el cambio o diferencia de serviciabilidad del pavimento utilizando la siguiente formula:

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

$$\Delta PSI = 2.5$$

Tabla 45. Nivel de serviciabilidad dependiendo de la conformidad final de la estructura.

Nivel de serviciabilidad final	Porcentaje de persona indicando inconformidad
3.0	12
2.5	55
2.0	83

Fuente: (AASHTO, 1993)

6.5.3. Confiabilidad (R)

La confiabilidad proporciona un nivel determinado de seguridad de que el pavimento sobrevivirá durante el periodo por el cual fue diseñado. En la tabla 46 se presentan los niveles de confiabilidad recomendados para distintas clasificaciones funcionales de carreteras, en esta se puede observar que los mayores niveles corresponden a las instalaciones que tienen mayor uso.

Tabla 46. Nivel de confiabilidad dependiendo del tipo de vía diseñar.

Clasificación funcional	Nivel recomendado de confiabilidad
-------------------------	------------------------------------



	Urbano	Rural
Autopistas	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: (AASHTO, 1993)

La vía en estudio es urbana colectora y según la tabla 46 la confiabilidad recomendada está entre 80% y 95%, de la cual se escogió 85%.

6.5.4. Desviación estándar (Z_R)

La desviación estándar se tomó de acuerdo con el valor de la confiabilidad, siendo de 1.037 según la tabla 47. El error estándar (S_o) para los pavimentos rígidos se encuentra en un rango que va de 0.3 a 0.4, del cual se seleccionó un valor de 0,39 asumiendo un comportamiento del pavimento con errores en el tránsito.

Tabla 47. Desviación estándar de acuerdo con la confiabilidad escogida para el diseño de pavimento.

Confiabilidad, R (Porcentaje)	Desviación estándar normal (Z_r)
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881



98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: (AASHTO, 1993)

6.5.5. Transferencia de carga (J)

Es un factor que describe la capacidad de la estructura del pavimento de concreto para transferir carga a través de discontinuidades (AASHTO, 1993). De acuerdo con la tabla 48, el valor escogido como el coeficiente de transferencia de carga es 2.8

Tabla 48. coeficiente de transferencia de carga segun el tipo de junta.

Berma Mecanismo de transferencia de carga	Asfalto		Pavimento rígido	
	Si	No	Si	No
Concreto simple o armados con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Concreto armado continuo	2.9 - 3.2	-	2.3 - 2.9	-

Fuente: (AASHTO, 1993)

6.5.6. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es la medida de la tenacidad y rigidez del concreto, o su capacidad elástica (Kosmatka Et al, 2004). El valor de este puede ser calculado según el instituto americano del concreto tal como sigue:

$$E_c = 57000(f'_c)^{0.5}$$

Donde f'_c es la resistencia del concreto en libras por pulgadas cuadradas.

De esta forma se trabajó con cuatro valores para el módulo de elasticidad, tres para concretos adicionados con fibras y otro para el concreto patrón sin fibras, los cuales se encuentran en la tabla 49:



Tabla 49. Módulo de elasticidad de cada uno de los concretos basado en su resistencia a compresión.

Módulo de Elasticidad E_c		
Concreto	F'c (Psi)	E_c (Psi)
CSF	5045.85	4048945.41
CCF-6KG	4900.57	3990230.24
CCF-12KG	4711.41	3912464.18
CCF-18KG	4478.39	3814482.26

Fuente: Autores.

6.5.7. Módulo de ruptura

Se la conoce también como resistencia a la tracción por flexión o simplemente resistencia a la flexión (Kosmatka Et al, 2004). Es la medida del esfuerzo en la fibra extrema que se desarrolla al someter una viga a la flexión. El módulo de ruptura utilizado será el obtenido para el concreto adicionado con fibras, y para el concreto patrón; estos valores son los registrados en la tabla:

Tabla 50. Modulo de rotura de cada uno de los concretos hallados con anterioridad.

Concreto	MR (PSI)
CSF	532.26
CCF-6KG	598.69
CCF-12KG	678.00
CCF-18KG	722.49

Fuente: Autores.

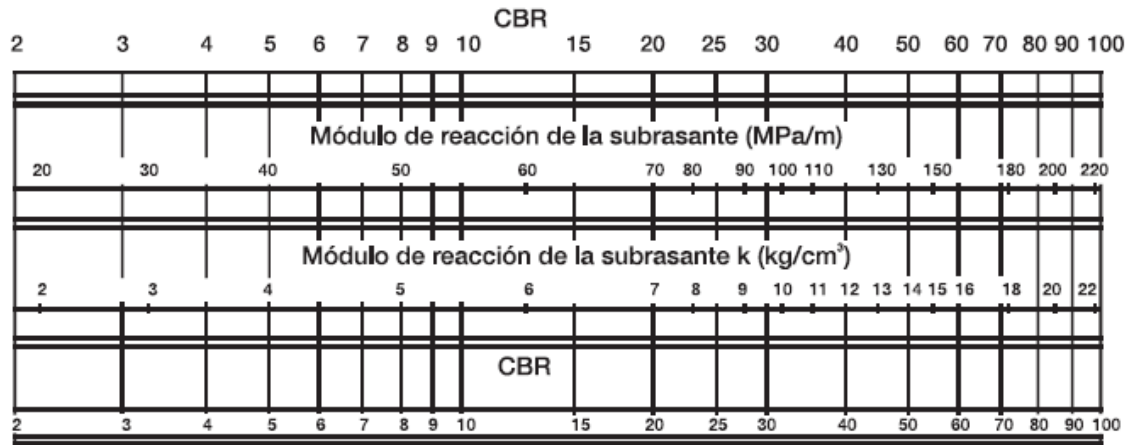
6.5.8. Módulo de reacción de la subrasante

El módulo de reacción de la sub rasante es el coeficiente que mide el comportamiento de un suelo ante las posibles cargas, depende de la deformación generada al suelo al aplicarle cierta carga, es un índice de la susceptibilidad que este puede llegar a tener en determinado momento al estar sometido a esfuerzo. (Kosmatka Et al, 2004)

Para efectos de diseño, el módulo de reacción de la sub rasante puede ser estimado en base al CBR del suelo, mediante la siguiente gráfica:



Ilustración 20. Relación promedio entre los factores del módulo de reacción y el CBR de un suelo.



Fuente: (Comité ACI 318, 2008)

Según los estudios geotécnicos previos en la zona proporcionados por la empresa INGUETO Y CIA LTDA, el CBR crítico en estado sumergido fue de 3.3 %, por lo cual se realizó una estabilización del suelo utilizando cal con el objetivo de mejorar las condiciones de CBR a un 10%. Utilizando la ilustración 21, se obtuvo un valor de 5,5 Kg/cm²/cm (200 Psi/in) para el módulo de reacción de la subrasante para un CBR estabilizado.

6.5.9. Drenaje

El coeficiente de drenaje describe el impacto que pueden causar las condiciones meteorológicas sobre el pavimento a diseñar. La calidad del drenaje se relaciona con la capacidad que posee la estructura para drenar el agua de escorrentía. En este caso se asumió que estos eventos pluviales se podrían controlar difícilmente, lo que significaría un estado crítico para el pavimento, por lo que se asume una calidad de drenaje pobre y un tiempo de remoción de 1 mes según la tabla 51.



Tabla 51. Calidad del drenaje en base al tiempo de remoción del agua supuesto.

Calidad del drenaje	Tiempo de remoción del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 días
Media	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	Agua no drena

Fuente: (AASHTO, 1993)

Una vez definida la calidad del drenaje del pavimento, se procedió evaluar la exposición de las capas de este en condiciones saturadas en épocas de lluvia. Tomando como referencia la precipitación anual en Cartagena de 1080mm (IDEAM, 2017) y sumado que el volumen de agua lluvia anual es normal y que los tiempos de flujos son cortos, se traduce en grandes volúmenes de aguas de escorrentía; por tanto, se toma una exposición saturada del 5 al 25% de las capas del pavimento en épocas húmedas. Una vez que se realizó este análisis, se procedió a definir el coeficiente de drenaje, que para este caso fue 0.85. Cabe resaltar que la empresa INGUETO Y CIA LTDA proporcionó los estudios hidrológicos de la zona, mediante los cuales se pudo estimar la calidad del drenaje de la zona por parte de los autores del presente proyecto.

Tabla 52. Coeficiente de drenaje en base a la calidad del drenaje.

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles próximos a la saturación			
	menor a 1%	1% - 5%	5% - 25%	mayor a 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1-10	1.10
Buena	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Media	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: (AASHTO, 1993)



6.5.10. Transito

La empresa INGUETO Y CIA LTDA proporcionó un estudio de tránsito, el cual se analizó y se obtuvo un número acumulado de ejes equivalente de 8,2 ton correspondiente a 7'553,781 para un periodo de diseño de 20 años.

6.5.11. Espesores

Una vez obtenidas todas las variables que son necesarias para realizar el diseño de mezcla, se procede a calcular los espesores requeridos para cada situación, en donde la única variable que varía son las capacidades mecánicas del concreto, como lo son la resistencia a la flexión o módulo de rotura y el módulo de elasticidad del concreto para cada uno de los diseños de mezclas. En la tabla 53 se resumen todas las variables utilizadas y en la tabla 54 los espesores despejados de la ecuación propuesta en el método de diseño AASHTO.

$$\log_{10} w_{18} = Z_r * S_0 + 7.35 \log_{10}(D + 1) - 0.6 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.624 * 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) * \log_{10} \left(\frac{S'_c * C_d [D^{0.75} - 1.132]}{215.63 * J (D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/K)^{0.25}})} \right)$$

Tabla 53. Variables involucradas en el diseño de la estructura de pavimentos.

Variables AASHTO 93	Valor
Seviciabilidad Inicial (Po)	4.5
Seviciabilidad Final (Pt)	2
Diferencia Seviciabilidad	2.5
Confiability (R)	0.85
Desviación Estándar (Zr)	1.037
Error Estándar (So)	0.39
Transferencia de Carga (J)	2.8
Módulo de Reacción de Subrasante (K)	200



Coefficiente de drenaje (Cd)	0.85
Tránsito (W18)	7553781

Fuente: Autores.

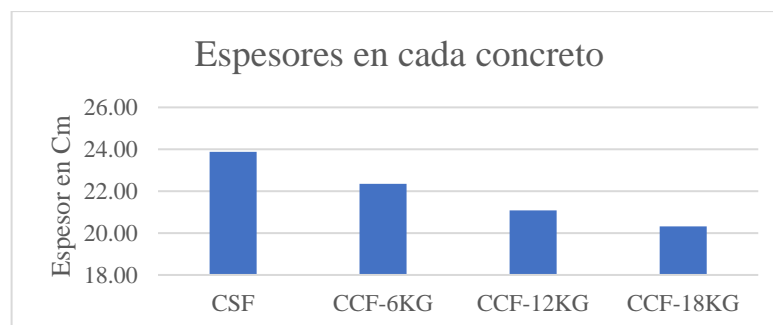
Tabla 54. Características de los concretos involucrados en el diseño de pavimento.

Concreto	Compresión (Psi)	Tracción (Psi)	Ec (Psi)	Módulo de Rotura (Mpa)	D (in)	D (cm)
CSF	5045.85	419.76	4048945.41	4.35	9.4	23.88
CCF-6KG	4900.57	471.83	3990230.24	4.80	8.8	22.35
CCF-12KG	4711.41	588.59	3912464.18	5.34	8.3	21.08
CCF-18KG	4478.39	551.01	3814482.26	5.65	8	20.32

Fuente: Autores.

Cabe resaltar que en los procesos donde se halló el espesor se tuvieron en cuenta las unidades de PSI para las variables que tienen que ver con las propiedades mecánicas del concreto (módulo de rotura y módulo de elasticidad). Se observa una disminución en cada uno de los espesores de los concreto fibro -reforzados con respecto al diseño de pavimento de la muestra patrón como se muestra en la gráfica 12, en donde se estableció que la adición de dosificaciones no tan altas de fibras aumenta en gran medida las propiedades mecánicas del concreto debido a la gran disminución inicial en el espesor de los diseños de pavimento en concreto. Por tanto, se decidió escoger las muestras CCF-6KG como referencia del estudio económico, debido a que están en un equilibrio de sus propiedades mecánicas.

Gráfica. 12. Comparación de los espesores de pavimentos hallados con cada diseño de concreto.



Fuente: Autores.



6.6. Evaluación económica.

Una vez obtenidos los resultados de los espesores en el diseño del pavimento, se realizó un análisis económico para el concreto sin adición de fibras y el adicionado con fibras, con el fin de verificar si existe una relación beneficio-costos en la adición de fibras sintéticas en los concretos para pavimento. En dicho estudio económico se efectuaron 3 análisis de precios unitarios para 3 diseños de mezclas, uno para la muestra patrón y otros para la mezcla escogida correspondiente a la dosificación de 6 kg/m³ y 12 kg/me de fibra respectivamente, con el fin de comparar económicamente estos materiales constructivos.

Se optó por analizar un concreto hecho en obra en unidades de m² ya que es una práctica común en pequeñas pavimentaciones, por tanto el equipo escogido para realizar la evaluación fue una mezcladora de 1'1/2 bulto cuyo rendimiento por defecto de la misma en condiciones ideales corresponde a 1,7 m³ por hora, en base a esto se halló el rendimiento en m² y este será el mismo para los trabajadores; los materiales utilizados están basados en las cantidades necesarias para un m³ de concreto calculadas anteriormente en el diseño de mezcla, siendo utilizadas las necesarias para un m² de pavimento teniendo en cuenta su espesor; y la mano de obra es la propuesta por la norma INVIAS para un concreto hecho en obra, dando como resultado los siguientes análisis de precios unitarios:

Tabla 55. Análisis de precios unitarios por metro cuadrado par el concreto sin fibras.

Item	Descripción				Unidad
	Concreto para pavimentos hecho en obra sin fibras.				m ²
1. Equipo					
Descripción	marca	Tipo	Tarifa/hora	Rendimiento	Valor unitario
Mezcladora de Tambor 1'1/2	ASTROMACK	Hora	\$ 5,000.00	7.12	\$ 702.24
Herramienta menor		GLB	\$ 1,500.00	1.00	\$ 1,500.00
Subtotal					\$ 2,202.24
2. Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor unitario	
Cemento tipo 1	Kg	107.02	\$ 500.00	\$ 53,512.09	
Grava 3/4 Cara fracturada	M3	0.100	\$ 55,800.00	\$ 5,568.93	
Arena lavada	M3	0.052	\$ 30,000.00	\$ 1,568.65	
Agua	M3	0.049	\$ 1,868.48	\$ 91.01	
Malla electro-soldada+Panelitas	M2	1.000	\$ 22,532.00	\$ 22,532.00	
Subtotal					\$ 83,272.68



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos, empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y polietileno



3. Mano de Obra						
Trabajador	Cantidad	Jornal/hora	Prestaciones	total	Rendimiento	Valor unitario
Maestro	1	\$ 6,250.00	207.00%	\$ 12,937.50	7.12	\$ 1,817.03
Ayudante	4	\$ 3,125.00	207.00%	\$ 25,875.00	7.12	\$ 3,634.07
Subtotal						\$ 5,451.10
Total costo directo						\$ 90,926.02

Fuente: Autores.

Tabla 56. Análisis de precios unitarios por metro cuadrado para el concreto con fibras CCF-6KG.

Item	Descripción					Unidad
	Concreto para pavimentos hecho en obra con 6Kg/m3 de fibras.					m2
1. Equipo						
Descripción	marca	Tipo	Tarifa/hora	Rendimiento	Valor unitario	
Mezcladora de Tambor 1'1/2	ASTROMACK	Hora	\$ 5,000.00	7.61	\$ 657.41	
Herramienta menor		GLB	\$ 1,500.00	1.00	\$ 1,500.00	
Subtotal						\$ 2,157.41
2. Materiales						
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor unitario		
Cemento tipo 1	Kg	100.19	\$ 500.00	\$ 50,096.42		
Grava 3/4 Cara fracturada	M3	0.093	\$ 55,800.00	\$ 5,213.47		
Arena lavada	M3	0.049	\$ 30,000.00	\$ 1,468.53		
Fibras Plasticas	Kg	1.341	\$ 20,000.00	\$ 26,822.40		
Plastificante	Kg	0.601		\$ -		
Agua	M3	0.046	\$ 1,868.48	\$ 85.20		
Subtotal						\$ 83,686.02
3. Mano de Obra						
Trabajador	Cantidad	Jornal/hora	Prestaciones	total	Rendimiento	Valor unitario
Maestro	1	\$ 6,250.00	207.00%	\$ 12,937.50	7.61	\$ 1,701.05
Ayudante	3	\$ 3,125.00	207.00%	\$ 19,406.25	7.61	\$ 2,551.58
Subtotal						\$ 4,252.63
Total costo directo						\$ 90,096.06

Fuente: Autores.

Tabla 57. Análisis de precios unitarios por metro cuadrado para el concreto con fibras CCF-12KG.

Item	Descripción					Unidad
	Concreto para pavimentos hecho en obra con 12Kg/m3 de fibras.					m2
1. Equipo						
Descripción	marca	Tipo	Tarifa/hora	Rendimiento	Valor unitario	
Mezcladora de Tambor 1'1/2	ASTROMACK	Hora	\$ 5,000.00	8.06	\$ 620.06	
Herramienta menor		GLB	\$ 1,500.00	1.00	\$ 1,500.00	
Subtotal						\$ 2,120.06



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



2. Materiales						
Descripción		Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor unitario	
Cemento tipo 1		Kg	94.50	\$ 500.00	\$ 47,250.03	
Grava 3/4 Cara fracturada		M3	0.088	\$ 55,800.00	\$ 4,917.25	
Arena lavada		M3	0.046	\$ 30,000.00	\$ 1,385.09	
Fibras Plásticas		Kg	2.530	\$ 20,000.00	\$ 50,596.80	
Plastificante		Kg	0.586		\$ -	
Agua		M3	0.043	\$ 1,868.48	\$ 80.36	
Subtotal					\$ 104,229.53	
3. Mano de Obra						
Trabajador	Cantidad	Jornal/hora	Prestaciones	total	Rendimiento	Valor unitario
Maestro	1	\$ 6,250.00	207.00%	\$ 12,937.50	8.06	\$ 1,604.40
Ayudante	3	\$ 3,125.00	207.00%	\$ 19,406.25	8.06	\$ 2,406.60
Subtotal					\$ 4,011.01	
Total costo directo					\$ 110,360.59	

Fuente: Autores.

Haciendo una comparación de los resultados, se observa que los concretos fibro-reforzados tienen mayor módulo de rotura y por lo tanto mayor resistencia a la flexión, esto conlleva a un menor espesor y a una disminución del gasto de dinero debido a la reducción en la cantidad de material; sin embargo, estos poseen fibra sintética, las cuales tienen un precio elevado, se observa que la dosificación de 6 kg/m³ tiene un margen de reducción de costo muy bajo con respecto a la muestra patrón. Es muy importante saber que el costo se dispara en el APU del concreto adicionado con fibras debido a la dosificación utilizada para la mezcla que corresponde a 12 kg/m³, la cual al ser unas dosificaciones tan alta genera unos costos elevados a pesar de que disminuye los espesores; por lo tanto, se recomienda emplear menor dosificación de fibra ya que a pesar de que la reducción del espesor será menor, se traduce en disminución de costos y resistencia mayor que con respecto al pavimento sin fibra.

Tabla 58. Comparación de costos por metro cuadrado entre CSF, CCF-6KG y CCF-12KG.

Concreto	Módulo de Rotura (Mpa)	D (in)	D (m)	APU (m ²)
CSF	4.35	9.4	0.239	\$ 90,926.02
CCF-6KG	4.80	8.8	0.224	\$ 90,096.06
CCF-12KG	5.34	8.3	0.211	\$ 110,360.59

Fuente: Autores.



7. Conclusiones

- Resultó muy importante conocer la caracterización de los agregados pétreos locales mediante diferentes ensayos, ya que de esta forma se comprobó que estos cumplieron de manera satisfactoria y por encima de los requisitos mínimos de calidad estipulados en la norma Colombiana INVIAS, la cual regula las características y propiedades de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos.
- El empleo de fibras disminuyó la resistencia a compresión a medida que se incrementaba el contenido de estas en la mezcla, este comportamiento se presentó debido al confinamiento que estas pudieron generar en la matriz del concreto. La disminución de la resistencia a la compresión para las dosificaciones de fibras de CCF-6KG, CCF-12KG y CCF-18KG con respecto a la muestra patrón fue del 2,82%, 6,63% y 11,25% respectivamente.
- A medida que se aumentó la dosificación de fibras en el concreto se incrementó la resistencia a la tracción indirecta; sin embargo, este comportamiento ocurre hasta cierto punto en el cual la resistencia empezó a disminuir; esta transición coincide con la dosificaciones de 12 kg/m³ a 18 kg/m³, en las cuales se obtuvo una resistencia a la tracción de 588.59 y 551.91 PSI respectivamente; de lo cual se infiere que dosificaciones muy elevadas de fibras pueden generar disminución en la resistencia a la tracción.
- El módulo de rotura es directamente proporcional a la cantidad de fibras presentes en la mezcla, mejorando los concretos de CCF-6KG, CCF-12KG y CCF-18KG en un 10.33%, 22.91% y 29.96% respectivamente con respecto a la muestra patrón, por lo cual se concluye que las fibras influyen directamente en el aumento de la resistencia a la flexión.



- El diseño de mezcla resultó satisfactorio debido a que se cumplió el requisito mínimo para el cual fue diseñado, obteniéndose de esta manera una resistencia superior a los 5000 psi en los ensayos de compresión. A su vez, el hormigón es aceptado según los estándares de la ACI 318, según la cual su nivel de resistencia cumple las condiciones propuestas en dicha norma.
- El módulo de rotura y el de elasticidad son los dos factores principales que determinan el diseño de espesores del pavimento, según la ecuación de la AASHTO el espesor es inversamente proporcional al módulo de rotura; de acuerdo con esto, para los concretos fibro-reforzados el módulo de rotura aumentó lo que permitió la disminución de los espesores del pavimento, obteniéndose de esta manera espesores de 22.35 cm, 21.08 cm y 20.32 cm para los concretos adicionados con fibras correspondientes al CCG-6KG, CCF-12KG y CCF-18KG respectivamente.
- Se hizo el análisis de precios unitarios para el concreto sin fibras y para el concreto adicionado con fibras de CCG-6KG y CCF-12KG, de lo cual se obtuvo que el concreto con fibras que contiene una dosificación de 12kg/m³ a pesar de tener un espesor menor es más costoso que el concreto sin adición de fibras; esto se debe al precio elevado de estas, sin embargo, el concreto con dosificación de 6 kg/m³, según el análisis es más económico que la muestra patrón, resultando positiva la inclusión de fibras al concreto en términos económicos.
- Para obtener un pavimento resistente, durable y económico se debe evitar el uso de dosificaciones muy altas de fibras para disminuir los costos asociados a la compra de estas y de los aditivos necesarios para dotar de manejabilidad a la mezcla de concreto, por lo que se recomienda buscar un equilibrio entre la dosis de fibra para alcanzar una resistencia deseada que reduzca el espesor del pavimento y que a su vez disminuya los costos.



8. Recomendaciones

- Utilizar un aditivo fluidificante cuando se trabajan mezclas adicionadas con fibras para devolverle manejabilidad y proveerle una mejor consistencia para la fácil colocación en los moldes y la correcta homogeneización de los materiales.
- Seleccionar cuidadosamente la relación agua/cemento para obtener la resistencia deseada y evitar posibles problemas durante la fabricación del concreto, para esto se recomienda escoger un valor mayor a 0.35 para destruir la posible porosidad y permeabilidad y brindar el ligante necesario para cubrir todos los materiales de la mezcla para que se distribuyan uniformemente sin que se afecte la capacidad de obtener grandes prestaciones mecánicas finales.
- Al momento de hacer la colocación de la mezcla en los moldes procurar hacer la compactación lo más uniforme posible para distribuir todo el contenido en el molde y evitar porosidad y bolsas de aire, sin embargo, se aconseja evitar el uso excesivo de vibrado manual para evitar la segregación.
- Utilizar cilindros normalizados con excelente calidad de acabado y alta precisión en las medidas y evitar emplear dosis elevadas de fibras para no afectar la manejabilidad de la mezcla, la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta del concreto.
- Optar por evitar el uso de dosificaciones muy altas de fibras en el concreto para disminuir costos, por lo que se recomienda buscar un equilibrio entre la dosis de fibra para alcanzar una resistencia deseada que reduzca el espesor del pavimento y que a su vez disminuya los costos.



Bibliografía

- AASHTO. AASHTO Guide For Design Of Pavement Structures (1993). USA.
- Acero, J. (2017). *Evaluación del uso combinado de fibras metálicas y sintéticas como refuerzo del concreto aplicado al soporte y revestimiento de túneles*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- ASTM, I. Especificación Normalizada para Agregados para Concreto, Pub. L. No. C33, 12 (2016). USA.
- Cemex. (2018). No Title. Retrieved from <https://www.cemex.com>
- Comité ACI 318. (2008). Requisitos de Reglamento para Acero para Acero Estructural ACI-318S-08. Retrieved from https://www.academia.edu/10778655/ACI-318-08_Español
- Cossio, M. L. T., Giesen, L. F., Araya, G., Pérez-Cotapos, M. L. S., VERGARA, R. L., Manca, M., ... Héritier, F. (2012). Analisis del Esfuerzo Residual en Concretos para Pavimentos Reforzados con Fibras Metalicas y Sinteticas. *Uma Ética Para Quantos?*, XXXIII(2), 81–87. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- D'Alessio, M., Yoneyama, B., Kirs, M., Kisand, V., & Ray, C. (2015). Pharmaceutically active compounds: Their removal during slow sand filtration and their impact on slow sand filtration bacterial removal. *Science of the Total Environment*, 524–525, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.014>
- Dixon, D. E., Prestrera, J. R., Crocker, D. A., Day, K. W., Dodl, C. L., Fox, T. A., ... Costa, W. J. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). *Concrete*, (Reapproved), 1–38.
- el constructor civil. (2011). resistencia a la flexion. Retrieved January 1, 2017, from <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/concreto-resistencia-la-flexion.html>



- Grdic, Z. J., Curcic, G. A. T., Ristic, N. S., & Despotovic, I. M. (2012). Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 27(1), 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.044>
- Group Toxement. (2016). *Fibras para refuerzo de concreto*. Bogota DC.
- IDEAM. (2017). Pronostico IDEAM. Retrieved June 11, 2018, from <http://www.ideam.gov.co/>
- INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. (2016). Colombia.
- José, F., & Jovells, D. (2016). *Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Kim, D. H., & Park, C. G. (2013). Permeability, abrasion, and impact resistance of latex-modified fibre reinforced concrete for precast concrete pavement applications. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 29(4), 239–254.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tenesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*.
- LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., & Amirkhanian, A. N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212>
- Londoño, C. (2012). ¿ que sabes de la contraccion del concreto? Retrieved from <http://blog.360gradosenconcreto.com/que-sabes-de-la-contraccion-retraccion-del-concreto/>
- MACCAFERRI. (2015). fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigon. MACCAFERRI.



- Marcano, M., & Lizcano, F. (2013). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5 MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. *Ciencia E Ingeniería*, 34(1), 13–20. Retrieved from <http://150.185.138.105/ojs/index.php/cienciaeingenieria/article/view/4412>
- Mastali, M., Dalvand, A., & Sattarifard, A. (2017). The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. *Composites Part B: Engineering*, 112, 74–92. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.029>
- Osorio, Jesus David. (2011). ¿Que es el modulo de elasticidad en el concreto? Retrieved from <http://blog.360gradosenconcreto.com/que-es-el-modulo-de-elasticidad-en-el-concreto/>
- Quiroz, M., & Salamanca, L. (2007). *Tecnología del Hormigo*. Universidad Mayor de San Simon.
- REVISTA CONSTRUCTIVO, G. (2016). concreto reforzado con fibras. Retrieved September 10, 2017, from <http://www.constructivo.com/cn/d/novedad.php?id=7>
- 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*. Quito, Ecuador.
- Sanchez, D. (2001). *tecnología del concreto y del mortero*. (B. E. LTDA, Ed.) (quinta). Bogotá.
- Sánchez, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. (Bhandar Editores SA, Ed.) (5 Edicion). Bogota DC: Cargraphics SA.
- SIKA. (2014). *Concreto reforzado con fibras. El concreto en la obra: problemas, causas y soluciones*. Bogota DC. <https://doi.org/DCT-VO-194-08/2014>



Mejoramiento del módulo de rotura del concreto hidráulico para pavimentos,
empleando agregados pétreos locales y fibras sintéticas de polipropileno y
polietileno



Silva, omar javier. (2016). las fibras en el concreto. Retrieved from
<http://blog.360gradosenconcreto.com/las-fibras-en-el-concreto/>

Tanzadeh, J., Vafaeian, M., & Yusefzadeh-Fard, M. (2017). Laboratory study on the
performance of hybrid macro soil fiber reinforced mixture. *Construction and Building
Materials*, 134, 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.053>

TOXEMENT. (2016). TUF - STRAND SF Fibras sintéticas estructurales, 3.