

**EVALUACIÓN DEL APORTE DE FIBRAS SINTÉTICAS EN EL MÓDULO DE  
ROTURA DEL CONCRETO**

**HENRY ALIRIO LÓPEZ PATIÑO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN INFRAESTRUCTURA  
VIAL - GRINFRAVIAL  
TUNJA  
2019**

**EVALUACIÓN DEL APORTE DE FIBRAS SINTÉTICAS EN EL MÓDULO DE  
ROTURA DEL CONCRETO**

**HENRY ALIRIO LÓPEZ PATIÑO**

**Proyecto en la modalidad de trabajo de grado  
para optar al título de Magíster en Ingeniería  
con Énfasis en Infraestructura Vial**

**Director:  
ING. MSc. CARLOS HERNANDO HIGUERA SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE POSGRADOS  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN INFRAESTRUCTURA  
VIAL - GRINFRAVIAL  
TUNJA  
2019**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

**Director**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Tunja, Julio de 2019**

**“El empleo que se le dé al presente documento es responsabilidad del usuario y en ningún momento comprometen al autor del mismo ni a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia”.**

**Se autoriza la reproducción parcial o completa del presente documento, indicando el origen.**

*Dedicado principalmente a Dios y a mis padres Julio Roberto y Serafina.*

*A mis hermanos, tíos, primos y demás familiares quienes han sido parte fundamental en mi crecimiento profesional y personal.*

*A las memorias de Alexander López, Héctor Moreno, Estela López y abuelitos Virgilio López y Elvira Nieto, a quienes en vida amamos tanto y cuyos recuerdos siempre perduran en nuestro ser.*

*Y por último, pero no menos importantes, a Marcela y mi pequeña Natalia Estefanía a quienes amo tanto y son el motor de mi vida.*

*Henry López.*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a DIOS quién me ha iluminado en cada paso que he dado en mi vida.

Al Ingeniero Carlos Hernando Higuera Sandoval director del proyecto, por haber brindado su apoyo incondicional para la culminación de mis estudios de maestría.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y a cada uno de los docentes de la maestría por haber compartido sus conocimientos y por las enseñanzas impartidas ayudando a mi crecimiento personal y profesional.

A la empresa Cerpagan SAS por haber suministrado los materiales pétreos para el desarrollo de la investigación y permitir aplicar los resultados obtenidos en la construcción de la plaza ganadera, con miras a obtener mediciones reales en campo que servirán como base para futuras investigaciones.

A mis hermanos, en especial a Wilson Javier quien estuvo presente en cada etapa del desarrollo de mi tesis y siempre ha estado apoyándome en todos los momentos de mi vida.

A Roberto Cáceres por su gran ayuda y disposición durante la etapa de fabricación de las muestras de concreto para la investigación.

Al Ingeniero Osmar Gamba, encargado del laboratorio de materiales por su colaboración y enseñanzas durante el desarrollo de los ensayos.

Finalmente, a los ingenieros Iván Guevara y Javier Niño quienes por su tiempo, disposición, enseñanzas y amistad me han ayudado al crecimiento profesional y personal.

## CONTENIDO

	pág.
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo general.	22
1.3.2 Objetivos específicos.	22
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 PAVIMENTOS RIGIDOS	24
2.1.1 Concreto.	24
2.1.2 Retracción del concreto.	24
2.1.2.1 Primera fase - asentamiento plástico.	24
2.1.2.2 Segunda fase - retracción plástica primaria.	25
2.1.2.3 Tercera fase – retracción autógena.	25
2.1.2.4 Cuarta fase – retracción plástica secundaria.	25
2.1.3 Concreto reforzado con fibras.	26
2.1.4 Fibras sintéticas.	26
2.1.5 Clasificación de las fibras sintéticas.	26
2.1.5.1 Por material.	27
2.1.5.2 Por funcionalidad, geometría y dosificación.	27
2.1.6 Características de las fibras sintéticas.	29
2.1.7 Diseño de mezclas con fibras.	30
2.2 ESTADO DEL ARTE (Científico y tecnológico)	30
2.2.1 Polímeros naturales.	31
2.2.2 Polímeros semisintéticos.	31
2.2.3 Polímeros sintéticos.	31
3. METODOLOGÍA	34
3.1 DEFINICIÓN DE HIPOTESIS	34
3.2 VARIABLES	34
3.2.1 Variables dependientes.	34
3.2.2 Variables independientes.	34

3.3	INDICADORES	34
3.4	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	35
3.4.1	Datos de entrada.	35
3.4.1.1	Materiales.	35
3.4.1.2	Caracterización de materiales.	35
3.4.2	Diseño de mezcla.	36
3.4.3	Fabricación y curado de muestras de concreto.	38
3.4.4	Transporte de muestras.	42
3.4.5	Ensayos de laboratorio.	42
3.4.6	Tamaño de las muestras.	43
3.4.7	Máquina de ensayo.	44
3.5	DISEÑO EXPERIMENTAL	44
3.6	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PETREOS Y DEL CEMENTO	48
3.7	RESULTADOS ESPERADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA	48
3.8	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE LAS MUESTRAS DE CONCRETO	48
3.8.1	Verificación diseño de mezcla.	48
3.8.2	Resultados de laboratorios ensayos de módulo de rotura.	48
3.8.3	Resultados de laboratorios ensayos de resistencia a la compresión.	55
3.8.4	Resultados de laboratorios ensayos de módulo de elasticidad.	62
4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS	66
4.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA ACEPTACIÓN DE RESULTADOS DE RESISTENCIA	66
4.1.1	Promedio de la muestra.	67
4.1.2	Desviación estándar de la muestra.	67
4.1.3	Promedio estimado del lote con un grado de confiabilidad dado.	68
4.1.4	Resultados estadístico para aceptación de resultados.	70
4.1.3.1	Módulo de rotura.	70
4.1.3.2	Resistencia a la compresión	79
4.1.3.2	Módulo de elasticidad	80
4.2	COMPARACIÓN ESTADÍSTICA MÓDULO DE ROTURA MUESTRA PATRÓN VERSUS MÓDULOS DE ROTURAS MUESTRAS CON ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS	87
4.3	COMPARACIÓN ESTADÍSTICA MÓDULO DE ELASTICIDAD MUESTRA PATRÓN VERSUS MÓDULOS DE ELASTICIDAD MUESTRAS CON ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS	95
4.4	COMPARACIÓN ESTADÍSTICA RELACIÓN DE POISSON MUESTRA PATRÓN VERSUS RELACIÓN DE POISSON MUESTRAS CON ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS	99



5. CONCLUSIONES	103
6. RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFIA	112

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características físico-químicas y mecánicas de las fibras sintéticas	29
Cuadro 2. Dosificación de materiales por peso	38
Cuadro 3. Dosificación de materiales	38
Cuadro 4. Número de capas requeridas por espécimen	40
Cuadro 5. Esquema diseño experimental	45
Cuadro 6. Criterios de validez para las mezclas de concreto	47
Cuadro 7. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón	49
Cuadro 8. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	50
Cuadro 9. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	51
Cuadro 10. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	51
Cuadro 11. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	52
Cuadro 12. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	53
Cuadro 13. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón	56
Cuadro 14. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	57
Cuadro 15. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	57
Cuadro 16. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	58
Cuadro 17. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	58
Cuadro 18. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	59
Cuadro 19. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón	63
Cuadro 20. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	63
Cuadro 21. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	64
Cuadro 22. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	64
Cuadro 23. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	65

Cuadro 24. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	65
Cuadro 25. Resultados ensayo módulo de rotura muestra FI-I-T-1	67
Cuadro 26. Factor que establece los límites del intervalo de confianza, k	69
Cuadro 27. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón	70
Cuadro 28. Validación de datos resultados muestra patrón	71
Cuadro 29. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibra Toc Fibra 500	71
Cuadro 30. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibra Toc Fibra 500	71
Cuadro 31. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	73
Cuadro 32. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	73
Cuadro 33. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	74
Cuadro 34. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	75
Cuadro 35. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	76
Cuadro 36. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	76
Cuadro 37. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	77
Cuadro 38. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	78
Cuadro 39. Resistencia promedio a la compresión de la muestra patrón	79
Cuadro 40. Resistencias promedios a la compresión de muestras con adición de fibras sintéticas	79
Cuadro 41. Módulo de elasticidad y relación de Poisson de la muestra patrón	81
Cuadro 42. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	81
Cuadro 43. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	82
Cuadro 44. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	83
Cuadro 45. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	85
Cuadro 46. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	86
Cuadro 47. Valores de distribución F para $\alpha = 1,00\%$ (Cuadro parcial, Parte 1)	89
Cuadro 48. Valores de distribución t para $\alpha = 1,00\%$ (Cuadro parcial)	91
Cuadro 49. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	92

Cuadro 50. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	93
Cuadro 51. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	93
Cuadro 52. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	94
Cuadro 53. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	95
Cuadro 54. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	96
Cuadro 55. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	96
Cuadro 56. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	97
Cuadro 57. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	98
Cuadro 58. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	98
Cuadro 59. Comparación estadística relación de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	99
Cuadro 60. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	100
Cuadro 61. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	101
Cuadro 62. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	101
Cuadro 63. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	102
Cuadro 64. Incremento del precio del concreto con inclusión de fibras sintéticas	108

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Microfibras sintéticas utilizadas en la investigación	27
Figura 2. Macrofibras sintéticas utilizadas en la investigación	28
Figura 3. Materiales utilizados para la fabricación de las muestras de concreto	39
Figura 4. Incorporación de fibras sintéticas a la mezcla de concreto	39
Figura 5. Medición del ensayo de asentamiento en las muestras de concreto	40
Figura 6. Muestras de concreto con adición de fibra Sikafiber AD	41
Figura 7. Curado de muestras de concreto	41
Figura 8. Ensayos de laboratorio	42
Figura 9. Equipo y aditamentos utilizados para ensayos de laboratorio	44
Figura 10. Identificación de especímenes prismáticos y reporte ensayo módulo de rotura	49
Figura 11. Fallas a flexión de especímenes prismáticos	53
Figura 12. Identificación de especímenes cilíndricos y reporte ensayo resistencia a la compresión	56
Figura 13. Fallas a compresión simple de especímenes cilíndricos	60
Figura 14. Identificación de especímenes cilíndricos y reporte ensayo módulo de elasticidad	62
Figura 15. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	72
Figura 16. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	74
Figura 17. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	75
Figura 18. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	77
Figura 19. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55	78
Figura 20. Variación resistencias a la compresión muestras con adición de fibras sintéticas en diferentes proporciones	80
Figura 21. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500	82
Figura 22. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF	83
Figura 23. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N	84
Figura 24. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD	85
Figura 25. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55.	86

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO - CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLA DE MUESTRA PATRÓN

ANEXO C. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FIBRAS SINTÉTICAS

ANEXO D. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

## RESUMEN

Este proyecto de investigación tiene como finalidad evaluar el aporte de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto. Para el desarrollo de la investigación se realizó el diseño de mezcla patrón para un módulo de rotura de 4,00 MPa utilizando materiales granulares disponibles y de uso comercial en la ciudad de Sogamoso en el departamento de Boyacá y cemento portland tipo I proveniente de la empresa Holcim. Para el análisis se utilizaron cinco tipos de fibras sintéticas en cinco proporciones diferentes cada una, obteniéndose un total de 25 mezclas de concreto con adición de fibras. Para cada muestra de concreto con y sin adición de fibras sintéticas, se elaboraron cuatro especímenes de concreto prismáticos de dimensiones 150mm x 150mm x 550mm para evaluación de la resistencia de la mezcla a flexión (módulo de rotura) utilizando una viga simplemente apoyada y cargada en el punto central (INV E-415-13) y cuatro especímenes de concreto cilíndricos de 150mm x 300 mm para evaluar los módulos de elasticidad de las probetas mediante el ensayo de módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto en compresión (Norma INV E-424-13)

En la investigación se utilizaron tres macrofibras (Sika Fiber Force PP/PE-700/55, Tuf Strand SF y Toc fibra 500) y dos microfibras (Sika Fiber AD y Fiber Strand N) producidas por las empresas SIKA y TOXEMENT. La adición de las fibras en sus diferentes porcentajes se realizó con base a la dosificación óptima por peso recomendada por los fabricantes. En los diseños de mezcla de concreto con adición de fibras sintéticas no se utilizó ningún tipo de aditivo, con el fin de establecer comparativos y criterios de validez en las características de las mezclas de concreto y en los resultados de resistencia realizados a los especímenes de concreto con y sin adición de fibras sintéticas.

Como producto final de la investigación, se presentan los resultados y análisis de los ensayos de laboratorio y se concluye cual es el aporte de las fibras sintéticas (microfibras y macrofibras) en el módulo de rotura del concreto. Finalmente, se plantean recomendaciones para la construcción del pavimento rígido de la plaza de ganado del municipio de Sogamoso utilizando mezclas de concreto reforzado con fibras sintéticas.

Palabras claves:

Concreto, pavimento rígido, fibras sintéticas, módulo de rotura, flexión, compresión, módulo de elasticidad, relación de Poisson.

## INTRODUCCIÓN

Las estructuras de pavimento rígido están sometidas a las cargas repetitivas producto del tránsito, por lo cual estas deben estar diseñadas para soportar dichas cargas, ser durables y funcionar durante todo el periodo de diseño, sin embargo, el principal problema a solucionar en el concreto es el control del fisuramiento durante las etapas constructiva y de funcionamiento del pavimento; ya que se puede presentar pérdida de la resistencia de diseño debido a la fisuración de las losas de concreto. Durante la fase constructiva de los pavimentos rígidos se presentan fenómenos indeseables en el estado plástico del concreto como el fisuramiento de las losas producto de la retracción de fraguado del concreto y el secado superficial prematuro del concreto debido a la acción de vientos fuertes y radiación solar. En el estado endurecido las losas se pueden fisurar por un deficiente curado del concreto y durante la vida útil del pavimento aparecen fisuras por la acción repetitiva de las cargas del tránsito produciendo la fatiga del pavimento, adicionalmente debido a los esfuerzos no uniformes por cambios de temperatura (alabeo) se producen cambios volumétricos en las losas que también fisuran significativamente las losas de concreto.

Para controlar el fisuramiento que se produce en estado plástico del concreto, se ha recurrido a diferentes técnicas para impedir la pérdida de humedad del concreto, mediante la aplicación de retardadores de evaporación, aplicación de niebla húmeda, incorporadores de aire para reducir la exudación y el uso de elementos que modifican las condiciones climáticas del sitio como sombras, barreras de viento y cerramientos<sup>1</sup>.

En estado endurecido el curado del concreto es el proceso más común, eficiente y económico para prevenir el fisuramiento de las losas de pavimento y garantizar que estas alcancen su resistencia de diseño y sean durables en el tiempo; existen diferentes métodos de curado como el realizado con agua y la aplicación de sellantes sobre las losas de concreto con el fin de evitar la evaporación. En cuanto a la fisuración de las losas de pavimento debido al efecto de las cargas del tránsito sobre las estructuras de pavimento, las losas presentan diferentes tipos de falla como las de borde, en el interior y en la esquina de las losas, que al ir aumentando su grado de severidad terminan deteriorando completamente la estructura de pavimento. Para el control de este tipo de fallas se realiza desde el diseño de la estructura de pavimento, el chequeo de los esfuerzos y deflexiones en cada uno de los puntos en cuestión, sin que estos sobrepasen los valores

---

<sup>1</sup> SIKA INFORMACIONES TÉCNICAS – CURADO DEL CONCRETO. SIKA Informaciones Técnicas Vol. 20 N° 1, Abril de 2005. ISSN-0122-0594



admisibles y conservando un factor de seguridad por encima de uno, con el fin de obtener una reserva posterior al periodo de vida útil del pavimento.

El fisuramiento producto de los esfuerzos por cambios no uniformes de temperatura en las losas de concreto, son controlados en el diseño de pavimentos mediante la modulación de las losas, cumpliendo con la relación de esbeltez especificada en los manuales de diseño para estructuras de pavimento rígido y mediante el uso de juntas entre losas. Sin importar los procesos constructivos y métodos que se usen para controlar los diferentes tipos de fisuras que se producen a las diferentes edades del concreto, estos no son suficientes ya que se siguen presentando fisuras que pueden afectar el buen desempeño de los pavimentos tanto en resistencia como en durabilidad.

Para muchos constructores y de hecho interventores, el tema del fisuramiento sin importar su causa pasa desapercibido y sin mucha relevancia, lo cual se evidencia en los cortos periodos de vida de los pavimentos rígidos reflejado principalmente en las fallas prematuras de las losas de concreto, asociadas en muchas ocasiones a mala calidad de los materiales y deficiencias en la compactación de las capas inferiores y en otros casos con eventos fortuitos como sobrecarga en los vehículos de transporte pesado y falta de control en el pesaje de los mismos, pero en muy pocos de los casos se concluye que la falla puede ser producto del microfisuramiento y/o fisuramiento del concreto en cualquiera que sea su edad; sin embargo, se ha demostrado técnicamente que un concreto que presente cualquier tipo de fisuramiento tanta a edad temprana como madura, está destinado a reducir drásticamente su capacidad estructural, confort y desde luego el periodo útil para el cual fue diseñado.

Pese a lo anterior, son muchos los esfuerzos tanto en procesos constructivos como en investigaciones para encontrar soluciones reales que ayuden a controlar el fisuramiento del concreto en cualquiera de sus edades y garanticen la vida útil del pavimento, dentro de las cuales se encuentra el uso de concreto reforzados con fibras metálicas y sintéticas. El uso de microfibras en el concreto ayudan a prevenir y/o disminuir el fisuramiento del concreto en estado plástico, y el uso de macrofibras en el concreto reduce la propagación de las fisuras en estado endurecido, ya que disminuye la posibilidad de que estas incrementen su longitud y espesor debido a la buena dispersión de las fibras y al efecto costura que se produce dentro de toda la matriz del concreto. Adicionalmente, una de las principales ventajas que trae el uso de las fibras tanto metálicas como sintéticas dentro de la matriz de concreto, es el incremento de la tenacidad y del módulo de rotura del concreto; dichos incrementos en estas propiedades pueden ayudar a reducir los costos de construcción y de mantenimiento en las estructuras de

pavimento rígido, ya que se podría reducir el espesor de las losas de concreto y prolongar la vida útil de estas.

El presente trabajo de investigación hace parte de las investigaciones del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL – de la Escuela de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. La investigación centra su estudio en evaluar el aporte de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto, dicha evaluación se realiza mediante la incorporación de dos microfibras y tres macrofibras por separado, cada una en proporciones diferentes dentro de la matriz de concreto y se realizan los ensayos a la flexión de las respectivas vigas prismáticas de concreto. Posteriormente, se comparan los resultados de los ensayos de laboratorio con los obtenidos para una mezcla de concreto sin adición de fibras (mezcla patrón). Para el desarrollo del estudio de investigación se comprende los siguientes capítulos:

En el primer capítulo de este informe se presenta la descripción del proyecto, presentando el planteamiento del problema, justificación de la investigación y los objetivos a cumplir durante el desarrollo del proyecto.

El segundo capítulo presenta el marco teórico, donde se explican los conceptos técnicos a saber, temas relacionados con el concreto convencional tanto en estado plástico como endurecido, características y tipos de fibras disponibles en el mercado nacional y finalmente los lineamientos básicos para el diseño y preparación de mezclas de concreto reforzados con fibras sintéticas.

En el tercer capítulo se aborda lo referente a la metodología aplicada en la presente investigación, describiendo las pruebas de hipótesis, el procedimiento aplicado en la fabricación, toma, transporte y ensayos realizados en los especímenes de concreto y finalmente el desarrollo del diseño experimental.

En el cuarto capítulo se presenta el análisis estadístico de los resultados de laboratorio realizados a los diferentes especímenes de concreto, estableciendo las comparaciones entre los resultados obtenidos en las mezclas de concreto con y sin adición de las fibras sintéticas.

En el quinto y sexto capítulo se enuncian las conclusiones y recomendaciones producto del análisis de laboratorio y de la información recopilada durante el desarrollo de la presente investigación.

Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas consultadas durante todo el tiempo de ejecución del proyecto investigativo.

En los anexos del proyecto se presenta la caracterización de los agregados utilizados, el diseño de mezcla utilizado en la investigación, características y propiedades de las fibras sintéticas y finalmente algunos resultados de módulos de elasticidad.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

El desarrollo del trabajo de investigación busca evaluar el aporte de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto, la evaluación se realiza mediante la incorporación por separado de dos microfibras y tres macrofibras sintéticas en diferentes dosificaciones y posteriormente se realizan los ensayos a flexión de cada una de las muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas. En este capítulo se presenta el planteamiento del problema, justificación de la investigación y los objetivos a cumplir durante el desarrollo del proyecto.

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las estructuras de pavimento rígido están sometidas a las cargas del tránsito y debido al exceso repetitivo de dichas cargas se produce la falla del pavimento por fatiga. Cuando se produce la primera grieta principal por fatiga, se disminuye el tiempo de vida útil del pavimento, ya que dicha grieta induce a la desintegración y fracturamiento de las losas en grietas longitudinales, transversales, de esquina y de bloque. Existen fisuras que se producen en el concreto tanto en estado fresco (retracción plástica) como en estado endurecido (cargas), por lo tanto la fisuración es un fenómeno indeseable para las estructuras de pavimento rígido, ya que afectan la durabilidad, transmisión y continuidad de las cargas, concentración de esfuerzos y la estética del pavimento.

En la construcción de los pavimentos rígidos se realizan juntas para controlar la aparición y/o propagación de las fisuras, pero no es suficiente ya que una vez la fisura aparece esta tiende a propagarse por toda la estructura llevándola al colapso. Lo ideal es alcanzar la mayor edad del concreto sin fisura alguna y en el caso de presentarse algún tipo o patrón de fisuramiento, se busca controlar la propagación y el ancho de las fisuras existentes; esto se logra con el uso de concretos reforzados con fibras. La incorporación de fibras en las mezclas de concreto evitan la aparición de fisuras a edad temprana y madura, aumentan la resistencia a la flexión permitiendo resistir mejor los esfuerzos dinámicos inducidos por fricción, alabeo y por efecto dinámico de las cargas de tránsito, de esta manera se garantiza que las estructuras de pavimento aumenten su vida útil de funcionamiento.

### **1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Los pavimentos rígidos son susceptibles a fisurarse tanto en estado fresco como en estado endurecido, ya sea por la composición de los materiales que conforman la mezcla, cambios térmicos de la zona, procesos químicos del concreto o por la acción repetitiva de las cargas del tránsito. Cualquiera que pueda ser el factor que

induzca a la aparición y/o propagación de las fisuras es necesario controlarlo con el fin de garantizar y/o aumentar la vida útil del pavimento para el cual fue diseñado.

Existen varias investigaciones que describen el desempeño del concreto modificado con la incorporación de fibras de acero para controlar los procesos de fisuramiento tanto a edad temprana como a edad madura, “a pesar de las ventajas que un concreto reforzado con fibras de acero puede presentar, su utilización se da esencialmente como suplemento para controlar el agrietamiento, aumentar la resistencia al impacto y resistir la desintegración del material (Aperador, Carrillo y Gonzalez. 2013)”<sup>2</sup>, cuya situación se debe principalmente a lo expresado por Carrillo, Gallo y Gonzalez. 2013: “El uso de concreto reforzado con fibras de acero (...) es muy limitado, debido a que en Colombia no existe suficiente evidencia experimental y requisitos reglamentarios al respecto”<sup>3</sup>. En lo referente al uso de las fibras sintéticas, por tratarse de un producto relativamente nuevo en el mercado de la construcción, las investigaciones acerca del comportamiento del concreto reforzado con fibras sintéticas van en aumento, ya que su implementación en la construcción de túneles, pavimentos, pisos industriales entre otros, está en auge. El conocimiento que se tiene acerca del tema es limitado, pero se ha podido concluir que los concretos modificados con fibras sintéticas evitan la aparición y/o propagación de las fisuras a tempranas y largas edades, aumentan la tenacidad del material y le permiten a las estructuras de pavimento continuar absorbiendo cargas después del agrietamiento de la estructura. Sin embargo, se deben orientar investigaciones con miras a realizar mediciones de fatiga del pavimento, para determinar el comportamiento de las fibras sintéticas en el concreto frente a la acción repetitiva de las cargas de tránsito.

Por lo tanto, es necesario realizar estudios que permitan prolongar la vida útil de los pavimentos rígidos y profundizar en el conocimiento del comportamiento del concreto modificado con el uso de fibras sintéticas, para obtener diseños de concreto más apropiados y realistas frente al comportamiento a la fatiga del pavimento acordes al tránsito y a las cargas de diseño.

La presente investigación pretende afianzar los conocimientos que se tienen a nivel nacional del uso de las fibras sintéticas en las mezclas de concreto y que sirva de base para futuras investigaciones, encaminadas a mejorar los diseños y construcción de las estructuras viales del país, en cuanto a funcionalidad,

---

<sup>2</sup> APERADOR, William, CARRILLO, Julián y GONZALEZ, Giovanni. Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. En: Ingeniería Investigación y tecnología. Julio-Septiembre, 2013. Vol. XIV, No. 3, p 437.

<sup>3</sup> CARRILLO LEÓN, Julián; GALLO ARCINIEGAS, Lina P. y GONZALEZ PEÑUELA, Giovanni. Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzo de compresión. En: Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Junio, 2013. Vol. 23-1, p.117.

durabilidad, disminución de los costos de construcción y mantenimiento de los futuros pavimentos rígidos; además que las estructuras viales que se construyan estén en capacidad de soportar las cargas inducidas por el constante crecimiento del parque automotor sin que esto afecte las estructuras viales existentes.

En el país se producen un sin número de mezclas de concreto para pavimento rígido, las cuales deben cumplir a cabalidad con los requerimientos especificados en el Artículo 500-13 “Pavimento de concreto hidráulico”, sin embargo, dichas mezclas difieren unas de otras según la región, en cuanto al tipo de cemento y al tipo de agregado grueso y fino utilizados en la producción de los concretos, ya que la utilización de estos materiales depende de la fuente de materiales disponibles dentro o cerca de la zona de influencia de cada proyecto, es por esto, que es importante para cada región tener mayor conocimiento acerca del comportamiento de los concretos producidos localmente frente a la incorporación de las fibras sintéticas en las mezclas de concreto, con el fin de diseñar y construir estructuras viales durables y económicas. Vale la pena resaltar que la construcción de los pavimentos rígidos son más económicos y fáciles de construir, por ende, es indispensable tener mayor conocimiento acerca de los concretos reforzados con fibras sintéticas, utilizando materiales pétreos de la región, ya que la construcción de estructuras de pavimento rígido en la región está en constante crecimiento.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Evaluar el aporte de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto mediante la utilización de materiales pétreos provenientes de la ciudad de Sogamoso del departamento de Boyacá y el uso de cemento Portland tipo I.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Caracterización de los agregados pétreos y del cemento Portland Tipo I.
- Determinar el diseño de mezcla patrón para un módulo de rotura a la flexo - tracción de 4,00 MPa.
- Caracterizar las fibras sintéticas a utilizar y de uso en Colombia.
- Dosificar la mezcla del concreto con cinco cuantías diferentes de fibras sintéticas.

- Determinar el módulo de rotura de cada una de las mezclas de concreto modificado con la incorporación de las fibras sintéticas.
- Evaluar el comportamiento del módulo de rotura obtenido de la mezcla patrón con los módulos de rotura obtenidos de las mezclas modificadas con fibras sintéticas.
- Evaluar el aporte de cada una de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto respecto al diseño de mezcla patrón.

## 2. MARCO TEÓRICO

El capítulo presenta los conceptos técnicos a saber, temas relacionados con el concreto convencional tanto en estado plástico como endurecido, características y tipos de fibras disponibles en el mercado nacional, lineamientos básicos para el diseño y preparación de mezclas de concreto reforzados con fibras sintéticas y finalmente el estado del arte del uso de fibras sintéticas en el concreto.

### 2.1 PAVIMENTOS RIGIDOS

Las estructuras de pavimento rígido están constituidas por una carpeta de concreto hidráulico de alta rigidez, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido. Los esfuerzos producidos por las cargas de tránsito se distribuye en una zona amplia debido al alto módulo de elasticidad y a la alta rigidez del concreto.<sup>4</sup>

**2.1.1 Concreto.** El concreto es una mezcla homogénea conformada por cemento, agua, materiales granulares como agregado fino (arena) y agregado grueso (grava) y en ocasiones aditivos, la cual se endurece y forma un material compacto y capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión según la resistencia de diseño.

**2.1.2 Retracción del concreto.** El concreto tiende a sufrir variaciones volumétricas después de que ha sido colocado y/o instalado en obra debido a cambios térmicos e hidrométricos en su estructura. Esas variaciones son más representativas a edad temprana y son comúnmente conocidas como la retracción del concreto.

*Las retracciones que ocurren en el hormigón antes de su endurecimiento se pueden dividir en cuatro fases.*

**2.1.2.1 Primera fase - asentamiento plástico.** *Ocurre antes de la evaporación del agua del hormigón; el espacio existente entre las partículas sólidas está lleno de agua. Cuando las partículas sólidas se asientan, existe la tendencia a que el agua, que es el elemento más liviano de la mezcla, suba para su superficie, formando una película. Ese fenómeno es conocido como exudación.*

---

<sup>4</sup> GUÍAS DE CLASE de Carlos Hernando Higuera Sandoval MSc. Profesor del curso "Diseño avanzado de pavimentos" capítulo 1 – principios básicos, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2012; p.34.



**2.1.2.2 Segunda fase - retracción plástica primaria.** Es la clásica fisura plástica. El agua superficial comienza a evaporarse por razones climáticas, calor, viento, insolación y cuando la tasa de evaporación excede a la de la exudación, el hormigón comienza a contraerse. Este tipo de retracción ocurre antes y durante el fraguado y es atribuida a las presiones que se desarrollan en los poros capilares del hormigón durante la evaporación.

**2.1.2.3 Tercera fase – retracción autógena.** Cuando la hidratación del cemento se desarrolla, los productos que se forman envuelven agregados manteniéndolos unidos; en esta fase, la importancia de la capilaridad disminuye y el asentamiento plástico y la retracción plástica primaria disminuyen también, tomando su lugar la retracción autógena, que cuando el hormigón está aún en estado plástico es pequeña, ocurriendo casi totalmente después el fraguado del mismo. En el pasado, esa parte de retracción era prácticamente rechazada, pero hoy, principalmente con la utilización de bajas relaciones de agua/cemento, la retracción autógena ocupó un lugar importante.

**2.1.2.4 Cuarta fase – retracción plástica secundaria.** Ocurre durante el inicio del endurecimiento del concreto. En cuanto el hormigón comience a ganar resistencia, la retracción plástica tenderá a desaparecer

*Las combinaciones más comunes de ocurrencia de la retracción plástica son las tres primeras fases: asentamiento plástico, retracción por exudación y la autógena. Siempre que hay restricciones en esas variaciones volumétricas, tanto internas como externas, se desarrollan tensiones de tracción con probabilidad de formaciones de fisuras. En los últimos años se ha observado un aumento significativo en las patologías asociadas a la retracción plástica del hormigón, que pueden estar ligadas a relaciones agua/cemento más bajas y a la utilización de cementos de finuras más elevada, además del empleo de otros materiales cementicios adicionados a él, como la escoria de alto horno, puzolanas, filler calcáreo, que son generalmente muy finos; se sabe que esas condiciones incrementan la retracción del hormigón (Kejin et al.,2001 e Neville, 1997)<sup>5</sup>.*

A edad madura del concreto, los efectos más comunes de los cambios dimensionales son:

- Retracción del material por secado
- Cambios térmicos (oscilación estacional o día noche)
- Ciclos de humedecimiento y secado
- Cargas externas de trabajo

---

<sup>5</sup> Martínez Jiménez, J., López Ríos, J, Portella Montardo, Julio y Ruiz Sibaja A. "La influencia de las fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos". En: Revista ingeniería de construcción. Abril, 2005. Vol. 20, no 1, p. 159.

**2.1.3 Concreto reforzado con fibras.** Actualmente, en el mercado nacional existen aditivos que mejoran algunas propiedades del concreto, según sean los requerimientos de construcción se requieren mejorar ciertas características como manejabilidad, tiempos de fraguado, resistencia, reducción de la permeabilidad entre otros. El uso de las fibras sintéticas es uno de los aditivos con mayor aceptabilidad, aunque faltan estudios y mayor conocimiento sobre el tema, se ha podido establecer que evita la formación de fisuras a edad temprana y reduce la propagación de las fisuras a edad madura del concreto. Una de las principales características que se mejoran en el comportamiento mecánico del concreto al adicionar fibras sintéticas, es el aumento de la tenacidad del material, propiedad que aumenta la capacidad de absorber las cargas mediante la deformación del material, es la habilidad entonces de absorber energía durante una deformación plástica antes de la ruptura.

Las fibras sintéticas son compatibles con todos los aditivos que se utilizan en el diseño de mezcla del concreto y con la química del cemento. La dispersión aleatoria de las fibras sintéticas dentro de la mezcla de concreto crea un refuerzo tridimensional capaz de soportar las cargas en cualquier dirección que sea aplicada. En ciertos casos, las fibras sintéticas pueden sustituir el refuerzo secundario (retracción de fraguado) del concreto, pero en ningún caso podrá reemplazar el refuerzo principal de las estructuras hasta que se demuestre lo contrario.

**2.1.4 Fibras sintéticas.** Las fibras sintéticas utilizadas en el diseño de mezclas de concreto se fabrican industrialmente con materiales sintéticos capaces de resistir el medio alcalino del concreto a largo plazo, no absorben agua y por lo tanto no afectan la relación agua/ cemento del diseño de mezcla. Las fibras sintéticas se añaden al concreto antes o durante los procesos de mezclado de los materiales. La incorporación de fibras sintéticas a la mezcla de concreto mejora ciertas características tanto en estado fresco como endurecido tales como<sup>6</sup>:

- Reducción de la fisuración por asentamiento (revenimiento)
- Reducción de la fisuración por contracción plástica
- Disminución de la permeabilidad
- Incremento de la resistencia a la abrasión y al impacto
- Aporte en la resistencia a la fractura

**2.1.5 Clasificación de las fibras sintéticas.** "Las fibras como refuerzo secundario para concreto en general pueden clasificarse según diferentes consideraciones, (ASFM 1116, EN 14889, EN 14889-2)"<sup>7</sup>. Se clasifican como:

---

<sup>6</sup> CIP 24 – FIBRAS SINTETICAS PARA EL CONCRETO, Información técnica preparada por la National Ready Mixed Concrete Association, 900 Spring St., Silver Spring, MD 20910.

<sup>7</sup> SIKA Colombia S.A.S. Construcción: Concreto reforzado con fibras. Bogotá, D.C. Sika informaciones técnicas, 2010, p7.

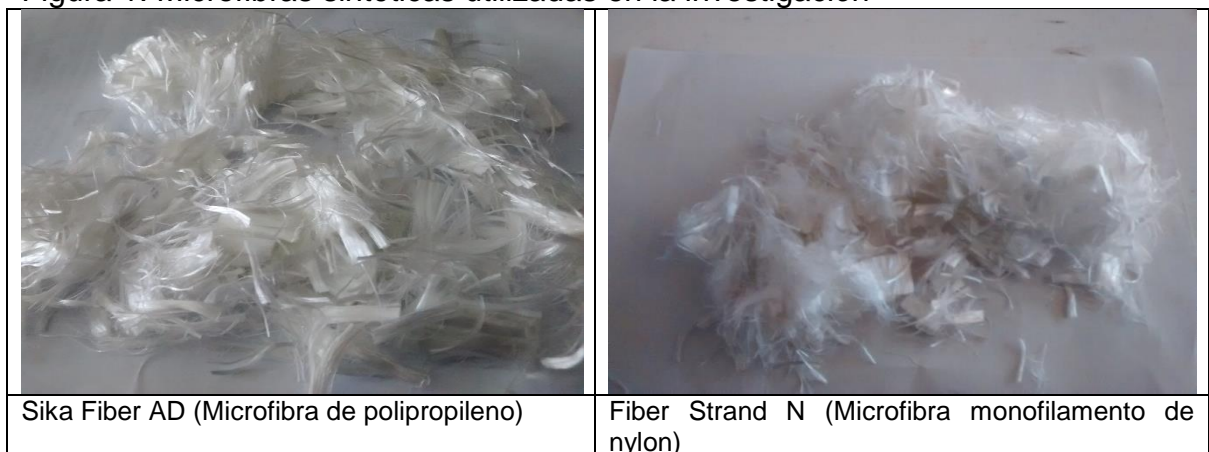
**2.1.5.1 Por material.** La clasificación de fibras por material es el siguiente:

- **Fibras metálicas.** Secciones discretas de metal que tienen una relación de aspecto (relación entre la longitud y el diámetro) que va desde 20 hasta 100. Estas fibras son de acero (en general de bajo contenido de carbón).
- **Fibras sintéticas.** Secciones discretas que se distribuyen aleatoriamente dentro del concreto que pueden estar compuestas por Acrílico, Aramid, Carbón, Polipropileno, Poliestileno, Nylon, Poliester etc.
- **Fibras de vidrio.** Secciones discretas de fibra de vidrio resistentes al álcali.
- **Fibras naturales.** Secciones discretas de origen como coco, sisal, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc. Cuyos diámetros varían entre 0,50 y 0,20 mm, con valores de absorción superiores al 12,00%<sup>8</sup>.

**2.1.5.2 Por funcionalidad, geometría y dosificación.** Esta clasificación de fibras se divide en dos grupos:

- **“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 de 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”<sup>9</sup>. En la Figura 1 se muestran las microfibras sintéticas utilizadas en la presente investigación.

Figura 1. Microfibras sintéticas utilizadas en la investigación



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

<sup>8</sup> Ibid., p.7.

<sup>9</sup> Ibid., p.9.

- **“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 0,20% a 0,80% 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<sup>10</sup>. Las macrofibras actúan en estado endurecido, es decir antes de las 24 horas no tienen mayor efecto. 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. En la Figura 2 se muestran las macrofibras sintéticas utilizadas en la presente investigación.

Figura 2. Macrofibras sintéticas utilizadas en la investigación



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

<sup>10</sup> Ibid., p.11.

**2.1.6 Características de las fibras sintéticas.** Para la caracterización de las fibras sintéticas utilizadas en la presente investigación y de uso comercial en el territorio nacional, se realizó un cuadro resumen a partir de las fichas técnicas elaboradas por los fabricantes de las fibras sintéticas. En el Cuadro 1, se presentan las principales características físico-químicas y mecánicas de las fibras sintéticas.

**Cuadro 1. Características físico-químicas y mecánicas de las fibras sintéticas**

	ITEM	TOC FIBRA 500	TUF STRAND SF	FIBER STRAND N	SIKA FIBER AD	SIKA FIBER FORCE PP/PE-700/55
	Descripción	Macrofibra refuerzo secundario de polipropileno fibrilado	Macrofibra refuerzo secundario de polipropileno / polietileno, monofilamento	Microfibra monofilamento de nylon para contracción plástica del concreto	Microfibra de polipropileno para el refuerzo de concreto y mortero	Macrofibra monofilamento de polipropileno y polímeros de alto desempeño
P R O P I E D A O A D E S	Gravedad específica (g/m <sup>3</sup> )	0,91	0,92	1,16	0,91	1,30
	Punto de fusión (°C)	166,00	-	260,00	160,00-170,00	-
	Punto de ignición (°C)	590,00	-	-	-	260,00
	Absorción de agua a 20°C	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
	Longitud de fibra (Pulg)	¾, 1, 1 ½, 2 ½	2	¾	¾	2
P R M O E P C I Á N D I A C D A E S	Módulo de elasticidad (Psi)	700000,00	1388000,00	-	213350,00	696,00
	Resistencia a la tensión (Psi)	80000,00	87000,00-94000,00	-	-	-
	Resistencia a la tracción (Psi)	70000,00	-	-	4267,00-4978,00	55213,00
	Elongación hasta el rompimiento, mínimo (%)	8	-	-	20,00-30,00	
	Rendimiento (Kg/m <sup>3</sup> )	1,00	1,80 -12,00	0,60	1,00	2,00-9,00
	Tiempo de mezclado adicional (min)	3,00 -5,00	3,00 -5,00	3,00	5,00	5,00

Fuente: Elaboración propia, 2016.

De acuerdo a la ficha técnica de cada una de las fibras sintéticas mostradas en la tabla anterior, el uso de las fibras sintéticas en el concreto no presentan absorción de agua, sin embargo, por el efecto costura que se produce dentro de la matriz de concreto y la dosificación de fibra que se utilice en el concreto, se puede presentar pérdida en la manejabilidad (reducción del asentamiento) del concreto, lo cual, se puede controlar con el uso de aditivos plastificantes, según la aplicación y manejabilidad requerida para la mezcla de concreto.

Las fibras sintéticas se pueden adicionar en cualquier etapa de fabricación del concreto antes de la colocación y se debe evitar el apelmazamiento de las fibras. Para garantizar una distribución uniforme de las fibras dentro de la matriz de concreto durante el mezclado, se deberá prolongar el tiempo de mezclado normal del concreto entre tres a cinco minutos adicionales. Aunque todos los fabricantes

presentan una dosificación recomendada para evitar apelmazamientos y obtener los mejores resultados, dicha dosificación podrá variar de acuerdo a las resistencias requeridas, uso del concreto y en especial a la calidad, cantidad, tamaño y forma de los agregados utilizados en la producción del concreto.

**2.1.7 Diseño de mezclas con fibras.** Los principios de diseño de mezclas de concreto con la incorporación de fibras sintéticas son los mismos que se utilizan para el concreto convencional. El uso de fibras sintéticas en el diseño de pavimentos rígidos aumenta la durabilidad de las estructuras, ya que permite mantener en funcionamiento los pavimentos que presentan alto grado de fisuramiento, debido a que las estructuras pueden seguir absorbiendo las cargas inducidas por el tránsito gracias al efecto costura que se forma dentro de la matriz de concreto.

## **2.2 ESTADO DEL ARTE (Científico y tecnológico)**

El concreto reforzado con fibras ha evolucionado desde sus inicios, gracias a los avances de la tecnología, las investigaciones realizadas y las experiencias recogidas alrededor del mundo acerca del tema. A pesar de las muchas investigaciones realizadas, aún se tiene mucha incertidumbre del comportamiento real de las mezclas de concreto con adición de fibras, sin embargo la experiencia recogida ha permitido desarrollar mezclas fibro-reforzadas con mejores características que los concretos convencionales. A continuación se presenta una reseña histórica de la evolución del concreto reforzado con fibras.

La primera patente del uso del hormigón reforzado con elementos metálicos aparece en California en 1874 por A. Berard. Con el paso del tiempo han surgido numerosas patentes del uso de concreto con diferentes tipos de fibras, entre las que se destaca la patente de G. Martin en 1927 en California, la cual describe la adición de alambres de acero rizados en el hormigón usado en las tuberías. El concreto reforzado con fibras de acero tiene numerosas investigaciones hacia los años 50'; en 1954 G. Constantinesco patenta en Estados Unidos el uso de fibras helicoidales y espirales para aumentar la resistencia a la fisuración y la absorción de energía en el concreto, patente que emplea parámetros muy similares a los actuales.

En los años 70' se comenzó a utilizar en Europa el concreto reforzado con fibras, pero fue en España donde se realizan numerosas construcciones de concreto reforzado con fibras de acero, entre las cuales se destaca tableros de puentes, pavimentos industriales, contenedores de puertos, revestimientos de túneles, etc.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> ÁLVAREZ, Ana Blanca. Estado general del conocimiento. Capítulo 2. p 5 -20.

El estudio y aplicación de las fibras metálicas en el concreto ha tenido una mayor investigación alrededor del mundo durante muchos años, mientras que las investigaciones y el uso de las fibras sintéticas en el concreto han sido menores y son más recientes en comparación con las fibras metálicas. Hacia los años 60' se realizan las primeras investigaciones del uso de las fibras sintéticas (poliméricas) para reforzar el concreto. A continuación se presenta un resumen de algunas investigaciones del uso de fibras en el concreto, realizadas en los últimos años<sup>12</sup>:

### **2.2.1 Polímeros naturales.**

- Argentina 2010: Diseño de hormigones y morteros ligeros de alta resistencia empleando zeolitas naturales sin presaturación.
- México 2013: Concreto polimérico reforzado con fibras de luffa.

### **2.2.2 Polímeros semisintéticos.**

- Venezuela 2008: Estudio de concreto elaborado con caucho de reciclado de diferentes tamaños de partículas.

### **2.2.3 Polímeros sintéticos.**

- Chile 2006: Investigación exploratoria respecto del efecto de la incorporación de polímeros acrílicos, compatibles con los álcalis del cemento, en la masa de hormigones de cemento.
- Venezuela 2008: Diseño de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento.
- Brasil 2006: Cemento geopolimero hormigón armado de acero de fibra.
- Brasil 2006: Influencia de adiciones de copolímero VA/E veoba fibras sintéticas en propiedades de pasta de cemento portland.
- Brasil 2010: Estudio experimental y modelo teórico del hormigo confinado lateralmente con polímeros reforzados con fibras (FRP).

---

<sup>12</sup> CERÓN CUEVAS, Ismael Antonio., MILAGUY GIL, Carlos Uriel. Estado del arte de la incidencia de los polímeros en el diseño de mezcla del concreto. Estudio a nivel mundial. Trabajo de investigación. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería, programa de ingeniería civil. 2014, p. 2. Disponible en repositorio institucional universidad católica de Colombia: <http://hdl.handle.net/10983/1572>

- Argentina: Hormigones de polímero, vinculación con hormigones tradicionales.
- México 2012: Concreto polimérico reforzado con fibras, efecto de la radiación gamma.
- México 1999: La múltiple identidad del concreto.
- México: Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plásticos y endurecido.
- Estados Unidos 2012: Influencia del policarboxilato éter polímeros (PCE) sobre la sostenibilidad en producción de hormigón.
- España 2011: Estudios de las materias primas de carácter polimérico para su aplicación al hormigón traslucido.
- España 2010 – 2011: Hormigón de ultra-alta resistencia con resinas acrílicas.
- España 2012: Estudios de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla.
- España 1987: Los hormigones con polímeros en la construcción, propiedades y aplicaciones.
- Rumania: Características mecánicas, investigación de hormigón polímero uso diseño mezcla de experimentos y de superficie.
- Inglaterra: Diseño de la mezcla, las propiedades mecánicas y resistencia al impacto de reactivo en polvo hormigón (RPC).
- Australia: Influencia de los polímeros en propiedades de amortiguación de hormigón.
- Pakistán 2010: Refuerzo a cortante de ménsulas con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP).
- Iraq 2005: Flexión, impacto y propiedades térmicas de hormigón polímero modificado.
- India 2010: Investigaciones y estudio sobre el efecto de las fibras de vidrio AR, polímero en autopolimerizable concreto autocompactable.



En Colombia, el uso de fibras sintéticas (polímeros) tiene gran acogida en la construcción de pavimentos y revestimiento de túneles. El uso de fibras sintéticas en el país es un tema de investigación en desarrollo, aunque se viene trabajando desde hace varios años, aún existen incertidumbres del comportamiento real del concreto frente al uso de las fibras sintéticas.

En los últimos años, el uso de fibras tanto sintéticas como metálicas se ha vuelto frecuente en el país, esto se evidencia en la construcción de estructuras fibro reforzadas como: elementos prefabricados, pisos industriales, pavimentos de carreteras y losas de puentes, box culvert, revestimiento de túneles, reparación de estructuras averiadas entre otras aplicaciones. Pese a que es una tecnología reciente, no se tiene certeza absoluta de las dosificaciones adecuadas, comportamiento y medición de las propiedades del concreto y criterios adecuados del uso de los concretos fibro reforzados.

Cabe destacar que los estudios realizados en Colombia frente al uso de las fibras sintéticas, han demostrado que en estado fresco controlan la contracción plástica del concreto y evitan la aparición y/o propagación de las fisuras a edades tempranas y maduras; en estado endurecido aumentan la tenacidad, la resistencia al impacto y brindan mayor resistencia a la fatiga de los pavimentos, como lo demuestran los estudios realizados por Boada y Reyes, 2013: en donde “las muestras con adiciones de fibras contaron con una mayor absorción de energía, ya que las fibras mantienen unidas las partículas en el concreto permitiendo mayores deformaciones y una mayor capacidad de soportar carga aun cuando se presenten agrietamientos”<sup>13</sup>. Sin embargo, se deben orientar investigaciones en campo, para determinar el comportamiento real de las fibras sintéticas en el concreto frente a la acción repetitiva de las cargas producidas por el tránsito.

---

<sup>13</sup> BOADA MARCANO, Mónica de los Ángeles y REYES LIZCANO, Fredy. Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. En: Revista ciencia e ingeniería. Diciembre-Marzo, 2013. Vol. 34, no. 1, p. 16.

### **3. METODOLOGÍA**

El capítulo describe la metodología aplicada para el desarrollo de la investigación, describiendo las pruebas de hipótesis, el procedimiento aplicado en la fabricación, toma, transporte y ensayos realizados a los especímenes de concreto y finalmente se presenta el desarrollo del diseño experimental de la investigación.

#### **3.1 DEFINICIÓN DE HIPOTESIS**

- La inclusión de fibras sintéticas en las mezclas de concreto aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.
- La inclusión de fibras sintéticas en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

#### **3.2 VARIABLES**

##### **3.2.1 Variables dependientes.**

- Módulo de rotura del concreto sin la adición de fibras sintéticas
- Módulo de rotura del concreto con la adición de fibras sintéticas

##### **3.2.2 Variables independientes.**

- Materiales pétreos y caracterización en laboratorio
- Cemento Portland tipo I
- Diseño de mezcla patrón
- Tipo de fibra
- Fibras sintéticas con cuantías diferentes de dosificación

#### **3.3 INDICADORES**

- Con base a la caracterización de los materiales y cemento se realiza un diseño de mezcla tipo, el cual será el mismo para todos los ensayos de laboratorio
- Dosificación de materiales para el diseño de mezcla en peso (Kg)
- Adición de agua (relación agua/cemento) para diseño de mezcla en Lt
- Adición de fibras sintéticas en peso (Kg) por metro cúbico de concreto

### 3.4 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación se aplicaron los procedimientos descritos en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras “Normas INVIAS-2013” y las Normas Técnicas Colombianas “NTC” referentes al diseño de concreto hidráulico. A continuación se presenta cada una de las normas de ensayo y los pasos que permiten desarrollar la presente investigación.

**3.4.1 Datos de entrada.** Como datos de entradas para el desarrollo de la metodología investigativa se tiene:

**3.4.1.1 Materiales.** Para la elaboración de la mezcla de diseño de la muestra patrón, los materiales a utilizar deberán cumplir lo especificado en el artículo 500–13 “Pavimento de concreto hidráulico” de la norma INVIAS en cuanto a lo especificado para cemento, agua, agregado fino y agregado grueso; no se tiene en cuenta los requerimientos para aditivos, puesto que no se emplearon en el desarrollo de la investigación.

**3.4.1.2 Caracterización de materiales.** Se debe realizar la caracterización de los materiales, tanto a los agregados finos y gruesos como al cemento utilizado (Véase el Anexo A).

- **Agregado grueso y fino:** Para la caracterización de los materiales se realizan los siguientes ensayos:
  - **Contenido de materia orgánica:** Norma INV E–212-13 “Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos”
  - **Granulometría:** Norma INV E-213-13 “Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino” y norma INV E-214-13 “Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200) en los agregados pétreos mediante lavado”
  - **Peso específico, masa unitaria suelta y apisonada:** Norma INV E– 217-13 “Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto”
  - **Absorción agregado fino:** Norma INV E–222-13 “Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino”

- **Absorción agregado grueso:** Norma INV E-223-13 “Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso”
- **Cemento:** el cemento para el diseño de la mezcla será hidráulico “Cemento Portland Tipo I”, cumpliendo el artículo 501-13 “Suministro de cemento hidráulico” de la norma INVIAS 2013 y la norma ASTM 150 “Especificación Estándar para cemento Portland”.

Para la caracterización del cemento se realizan los siguientes ensayos:

- **Peso específico del cemento:** Norma INV E-307-13 “Densidad del cemento hidráulico”
- **Finura del cemento:** Norma NTC 33 “Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire”.

Teniendo en cuenta que el cemento utilizado en la investigación es de una marca reconocida, la cual cumple con los estándares nacionales para producción y comercialización de cemento, se solicitó al proveedor del producto la ficha técnica del cemento y se verificó el cumplimiento de los requerimientos establecidos en las especificaciones particulares.

- **Agua:** El agua utilizada para la mezcla deberá cumplir la norma INV E-417- 13 “Calidad del agua para concretos”

El agua utilizada para la realización de las diferentes mezclas de concreto es agua potable, es decir, la usada para consumo humano, ya que esta cumple con los requerimientos establecidos en la norma mencionada anteriormente.

**3.4.2 Diseño de mezcla.** Una vez realizada la caracterización de todos los materiales necesarios para la producción de la mezcla de concreto (Véase el anexo A), se procedió a realizar el diseño de la mezcla mediante el método gráfico propuesto por Fuller y Thompson, ajustado por Bolomey. La aplicación del método se fundamenta en que los agregados no cumplen las normas de gradación propuestas por el INVIAS para pavimentos de concreto hidráulico.

Como se mencionó en párrafos anteriores, los materiales utilizados en las mezclas de concreto para pavimentos rígidos deben cumplir a cabalidad con las especificaciones nombradas en el artículo 500 del manual INVIAS, sin embargo se decide continuar con la investigación utilizando los materiales mencionados, por las siguientes razones:

- Teniendo en cuenta lo establecido en el numeral “**500.4.5.4 Mezcla de los componentes**” del artículo 500 del Manual INVIAS, donde se especifica lo siguiente<sup>14</sup> “La mezcla se realizará en una planta central, conforme se describe en el numeral 630.3.2 del artículo 630-13”, se ha evidenciado que en muchos municipios del país, la construcción de los pavimentos rígidos se realiza produciendo el concreto en sitio con los materiales disponibles de la región, donde la mayoría de las veces la grava ni la arena cumplen con las granulometrías recomendadas en el artículo 500 de la norma INVIAS-2013; de esta manera los diseños de las mezclas de concreto se basan en la optimización de los agregados para lograr la resistencia de diseño requerida, donde el cumplimiento de las especificaciones de construcción se controla únicamente con la validez del criterio de la resistencia de diseño del concreto. Adicionalmente, es común ver que algunos profesionales dedicados a la construcción, interventoría o supervisión de obra, el tema de la calidad de los materiales con los que se produce el concreto pasa a segundo plano, ya que muchos profesionales por desconocimiento del tema y/o falta de experiencia argumentan que el cumplimiento de la resistencia de diseño del concreto a compresión o flexión, es prueba suficiente para liberar tramos de la estructura de pavimento. Por tal razón, es una buena oportunidad para resaltar las implicaciones que traen sobre la estructura de pavimento, la utilización de agregados que no cumplen con los requerimientos exigidos en el Artículo 500-13 del Manual INVIAS para la producción del concreto y sus consecuencias a corto y largo plazo en las estructura de pavimento.
- CERPAGAN SAS es una empresa legalmente constituida en Octubre del año 2016 por pequeños ganaderos de la provincia de Sugamuxi con recursos propios de sus accionistas; dentro de las políticas de la empresa los socios aportan capital y/o materiales para la construcción de las instalaciones de la plaza destinada para la feria comercial y ganadera del municipio de Sogamoso. Uno de los socios dispone de la grava y arena utilizada en la presente investigación y aporta dichos materiales para la construcción de los pavimentos rígidos de la plaza ganadera, por consiguiente, CERPAGAN SAS proporciona los agregados pétreos para el desarrollo de esta investigación, con miras a buscar las mejores aplicaciones de dichos materiales para la construcción de la plaza. El diseño de mezcla se realiza por la metodología anteriormente descrita, con el fin de lograr una mejor optimización de los materiales granulares disponibles y determinar que estructuras presentarán mejor comportamiento con el uso de este tipo de concreto.

El diseño de mezcla de concreto se realizó para un módulo de rotura de 4,00 MPa obteniéndose un diseño de mezcla patrón, el cual no incluye ningún tipo de fibra

---

<sup>14</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Capítulo 5 Pavimentos de concreto: ART. 500 Pavimento de concreto hidráulico. Numeral 500.4.5.4 Mezcla de los componentes. INVIAS 2013, p. 27.

y veinticinco diseños adicionales con la incorporación de una fibra sintética. En el Cuadro 2 se presenta la dosificación por peso de los materiales por metro cúbico (m<sup>3</sup>) para la mezcla diseñada.

Cuadro 2. Dosificación de materiales por peso

Ingrediente	Peso seco (Kg/m <sup>3</sup> )
Agua	249
Cemento	475
Arena	631
Grava	946

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Teniendo en cuenta que se requiere la fabricación de 4 vigas prismáticas y 4 cilindros de concreto, tanto para la muestra patrón como para las muestras con adición de fibras, es necesario obtener el diseño de mezcla por bulto de cemento, ya que la mezcla obtenida es suficiente para la fabricación de los especímenes indicados anteriormente. En el Cuadro 3 se presenta la dosificación por bulto de cemento y agregados secos por peso.

Cuadro 3. Dosificación de materiales

Agua (Lt)	26
Cemento (Kg)	50
Arena (Kg)	66
Grava (Kg)	100

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para el desarrollo de la investigación, se utilizaron cinco fibras sintéticas incorporadas al diseño de mezcla patrón en cinco proporciones diferentes de dosificación, las cuales se adicionaron a la mezcla según recomendaciones del fabricante y bibliografía consultada.

**3.4.3 Fabricación y curado de muestras de concreto.** La fabricación y curado de los especímenes de concreto de la muestra patrón y de las muestras con adición de fibras sintéticas, se realizaron de forma controlada tal y como lo describe la norma INV E-402-13 “Elaboración y curado de especímenes de concreto en laboratorio para ensayos de compresión y flexión” y se utilizaron los moldes, equipos y herramientas allí descritos para su fabricación. En la Figura 3 se muestran los materiales pétreos medidos por peso, agua en litros y el cemento marca Holcim por bulto de 50 Kg utilizados en la presente investigación.

Figura 3. Materiales utilizados para la fabricación de las muestras de concreto



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

Para el proceso de mezclado de los materiales se utilizó una mezcladora mecánica de 1 bulto de capacidad. Una vez adicionados los materiales a la mezcladora, el proceso de mezclado de cada una de las muestras duró 5 minutos, tiempo en el cual se alcanzó la homogeneidad de las muestras de concreto. Para las muestras de concreto con adición de fibras sintéticas, el proceso de mezclado consistió en adicionar las fibras directamente a la mezcla, una vez añadida la fibra se prolongó 5 minutos el mezclado inicial para garantizar la dispersión y uniformidad de las fibras en las mezclas. En la Figura 4, se muestra el proceso utilizado para incorporar las fibras sintéticas durante el proceso de mezclado del concreto.

Figura 4. Incorporación de fibras sintéticas a la mezcla de concreto



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

A cada una de las muestras de concreto se le realizó el ensayo de asentamiento tal y como se muestra en la Figura 5, siguiendo la metodología descrita en la norma INV E-404-13 “Asentamiento del concreto de cemento hidráulico (Slump)” con el fin de determinar la variación de la fluidez de las mezclas de concreto con y sin la incorporación de las fibras sintéticas.

Figura 5. Medición del ensayo de asentamiento en las muestras de concreto



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

La fabricación de los cilindros y de las vigas prismáticas se realizó mediante apisonado en tres y dos capas respectivamente, tal y como se describe en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Número de capas requeridas por espécimen

TIPO Y TAMAÑO DEL ESPÉCIMEN	MÉTODO DE CONSOLIDACIÓN	NÚMERO DE CAPAS DE ESPESOR APROXIMADAMENTE IGUAL
Diámetro, mm (pulg):		
75 a 100 (3 a 4)	Apisonado	2
150 (6)	Apisonado	3
225 (9)	Vibración	4
hasta 225 (9)	Vibración	2
PRISMAS Y CILINDROS PARA CREEP HORIZONTAL		
Espesor, mm (pulg):		
hasta 200 (8)	Apisonado	2
más de 200 (8)	Apisonado	3 o más
hasta 200 (8)	Vibración	1
más de 200 (8)	Vibración	2 o más

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Sección 400 – Concreto hidráulico: I.N.V.E-402 Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión. Tabla 402 – 1. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, p. E 402-13.



Cada una de las muestras está conformada por cuatro especímenes prismáticos de dimensiones mínimas 150mm x 150mm x 550mm y cuatro especímenes cilíndricos de dimensiones 150mm x 300mm. En la Figura 6, se observan las muestras de concreto con adición de una misma fibra en cinco dosificaciones diferentes.

Figura 6. Muestras de concreto con adición de fibra Sikafiber AD



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

El curado de las muestras de concreto se realizó por inmersión en agua en un tanque a temperatura ambiente hasta el momento del ensayo. En la Figura 7, se muestra el proceso de curado realizado a los especímenes de concreto.

Figura 7. Curado de muestras de concreto



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

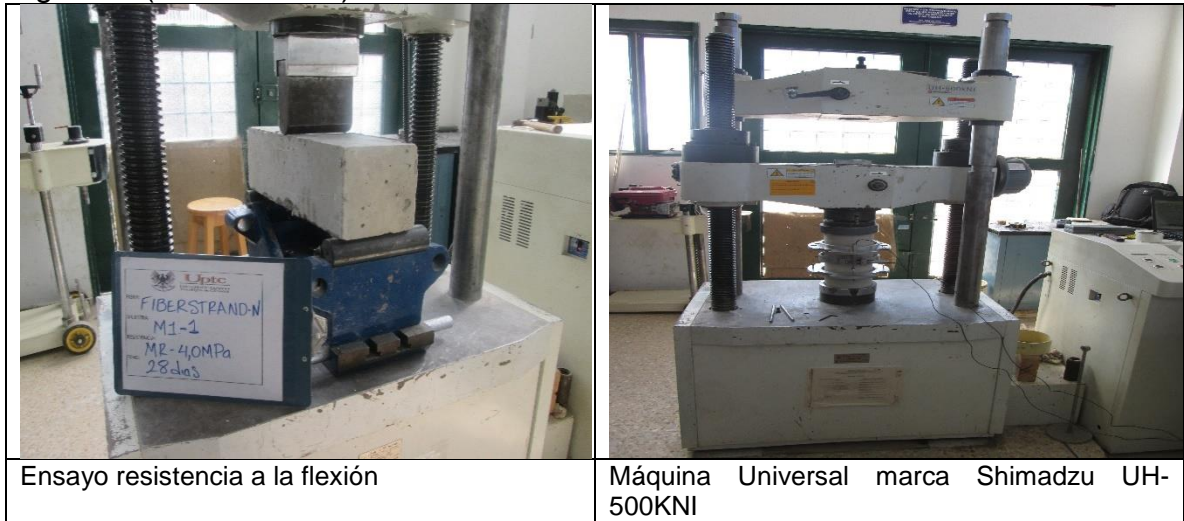
**3.4.4 Transporte de muestras.** Debido a que las muestras de concreto se fabricaron en la ciudad de Sogamoso, fue necesario realizar el transporte de los especímenes de concreto al laboratorio de la UPTC seccional Tunja para realizar los ensayos respectivos, el transporte de las muestras se realizó siguiendo lo descrito en el numeral 9 “Transporte de los especímenes al laboratorio” de la norma INV E-420-13 “Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto para ensayo”

**3.4.5 Ensayos de laboratorio.** Las diferentes probetas de las mezclas de concreto con y sin adición de fibras sintéticas se ensayaron en el laboratorio en estado endurecido a los 28 días de edad. Para cada una de las probetas fabricadas se evaluó la resistencia de la mezcla a flexión siguiendo los procedimientos descritos en la norma INV E-415-13 “Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en el punto central”, módulo de elasticidad del concreto siguiendo lo descrito en la INV E-424-13 “Modulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto en compresión” y resistencia a la compresión de cilindros cumpliendo con lo descrito en la norma INV E-410-13 “Resistencia a la compresión de cilindros de concreto”. En la Figura 8 se muestran los ensayos realizados a los especímenes de concreto y los equipos utilizados para la ejecución de los respectivos ensayos. Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Materiales y Estructuras perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, seccional Tunja.

Figura 8. Ensayos de laboratorio



Figura 8. (Continuación)



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

**3.4.6 Tamaño de las muestras.** Para el ensayo de flexión se fabricaron cuatro especímenes prismáticos de concreto por cada muestra de concreto con adición y sin adición de fibra sintética, cuyas dimensiones mínimas son 150mm x 150mm x 550mm, la preparación y curado de los especímenes de concreto se realizó de acuerdo a la norma de ensayo INV E-402-13.

Para el ensayo de módulo de elasticidad se fabricaron cuatro especímenes cilíndricos de concreto por cada muestra de concreto con adición y sin adición de fibra sintética, cuyas dimensiones son 150mm x 300mm, la preparación y curado de los especímenes de concreto se realizó de acuerdo a la norma de ensayo INV E-402-13. De los cuatros especímenes fabricados dos se fallaron a compresión con el fin de determinar la resistencia última de cada muestra de concreto y así obtener el 40% de su valor de resistencia, la cual fue utilizada para el ensayo de módulo de elasticidad tal y como se describe en el numeral 3.2 de la norma INV E-424-13 y los dos especímenes cilíndricos restantes de cada muestra de concreto fueron utilizados para realizar el ensayo de módulo de elasticidad.

Cada uno de los especímenes se referenció con fecha de elaboración, tipo de fibra y dosificación usada. Los especímenes de concreto para cada muestra de concreto con y sin adición de fibra sintética se fallaron a los 28 días de edad, para comprobación y aceptación de cada uno de los resultados obtenidos. Para las mezclas con adición de fibras sintéticas se varió la dosificación de las fibras, obteniéndose para cada diseño de mezcla cinco cuantías diferentes de dosificación por fibra utilizada y se realizó la evaluación de los módulos de rotura y de elasticidad para cada una de las mezclas obtenidas.



**3.4.7 Máquina de ensayo.** La máquina de ensayo utilizada para determinar los módulos de rotura y de elasticidad de las muestras de concreto fabricadas, es la máquina universal marca Shimadzu UH-500KNI del Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia “UPTC”, la cual cumple con los requerimientos especificados en el anexo A de la norma INV E-414-13 “Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre” y con los requerimientos especificados en el numeral 4.1 de la norma INV E-424-13 “Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto en compresión”. Los procedimientos de ensayo para obtener los módulos de rotura y de elasticidad del concreto, se desarrollaron conforme lo describe cada una de las respectivas normas de ensayo. En la Figura 9 se muestra la disposición de las muestras de concreto en la máquina universal y los aditamentos utilizados en cada ensayo para obtener los valores de módulo de rotura y de elasticidad en cada uno de los especímenes ensayados.

Figura 9. Equipo y aditamentos utilizados para ensayos de laboratorio



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

### 3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Con base a la metodología de diseño de mezcla de concreto utilizada, se diseñó una mezcla patrón (sin adición de fibras sintéticas) para un concreto de módulo de rotura de 4,00 MPa y varias mezclas modificadas (con adición de fibras sintéticas en diferentes proporciones) para concretos de módulo de rotura de 4,00 MPa.

Los diseños de las mezclas de concreto se realizaron utilizando agregados granulares provenientes de fuentes de materiales cercanas al municipio de Sogamoso (la misma fuente para todos los diseños de mezcla) y cemento

portland tipo I. Las fibras sintéticas utilizadas para las mezclas de concreto modificadas, son de tipo industrial y se realizaron veinticinco mezclas adicionando las diferentes fibras en diferentes dosificaciones; las dosificaciones utilizadas se basaron según recomendaciones del fabricante y bibliografía consultada. Las fibras sintéticas utilizadas son:

- Toc Fibra 500 (macro fibra de polipropileno fibrilada)
- Tuf Strand SF (macro fibra polipropileno / polietileno)
- Fiber Strand N (micro fibra monofilamento de Nylon)
- Sika Fiber AD (micro fibra de polipropileno)
- Sika Fiber Force PP/PE – 700/55 (macro fibra de polipropileno)

Con base al diseño de las mezclas de concreto (agregados y tipo de cemento) y al tipo de fibra sintética (dosificación en peso) a utilizar en las mezclas, se presenta en el Cuadro 5 el esquema realizado en el diseño experimental de la presente investigación.

Cuadro 5. Esquema diseño experimental

Fuente de materiales	Cemento portland tipo	Fibra sintética	Dosificación de la fibra	Mezcla
F1	I	-	-	F1 - I
F1	I	Toc Fibra 500	1 (55,00g)	F1 - I - T - 1
			2 (80,00g)	F1 - I - T - 2
			3 (105,20g)	F1 - I - T - 3
			4 (130,00g)	F1 - I - T - 4
			5 (155,00g)	F1 - I - T - 5
F1	I	Tuf Strand SF	1 (189,36g)	F1 - I - SF - 1
			2 (220,92g)	F1 - I - SF - 2
			3 (252,48g)	F1 - I - SF - 3
			4 (284,04g)	F1 - I - SF - 4
			5 (315,60g)	F1 - I - SF - 5
F1	I	Fiber Strand N	1 (65,00g)	F1 - I - N - 1
			2 (95,00g)	F1 - I - N - 2
			3 (125,00g)	F1 - I - N - 3
			4 (155,00g)	F1 - I - N - 4
			5 (185,00g)	F1 - I - N - 5
F1	I	Sika Fiber AD	1 (55,00g)	F1 - I - AD - 1
			2 (80,00g)	F1 - I - AD - 2
			3 (105,20g)	F1 - I - AD - 3

Cuadro 5. (Continuación)

Fuente de materiales	Cemento portland tipo	Fibra sintética	Dosificación de la fibra	Mezcla
F1	I	Sika Fiber Force	4 (130,00g)	F1 - I - AD - 4
			5 (155,00g)	F1 - I - AD - 5
			1 (189,36g)	F1 - I - F - 1
			2 (220,92g)	F1 - I - F - 2
			3 (252,84g)	F1 - I - F - 3
			4 (284,04g)	F1 - I - F - 4
			5 (315,60g)	F1 - I - F - 5

Fuente: Elaboración propia, 2017.

**Fuente F1:** Agregado grueso proveniente de la planta de agregados de Colconcretos S.A. ubicada en el municipio de Nobsa – Boyacá y agregado fino proveniente del sector Vado Castro en el municipio de Sogamoso.

**Cemento Portland tipo I:** Para el diseño de las mezclas de concreto se utilizó cemento Holcim en bolsas de 50Kg.

**Fibra sintética:** Para la fabricación de las mezclas de concreto modificado se utilizaron fibras sintéticas de uso comercial distribuidas por las empresas SIKA COLOMBIA S.A y TOXEMENT S.A.

**Dosificación de la fibra:** La dosificación utilizada en los diseños de mezcla según la fibra utilizada, se realizó con base a las recomendaciones de los fabricantes y a la bibliografía consultada. Para cada una de las fibras se obtuvieron cinco dosificaciones diferentes en peso (Kg/m<sup>3</sup>).

**Mezclas:** Se realizarán diferentes mezclas de concreto con y sin adición de fibras sintéticas, cada una identificada según el tipo de fibra y el porcentaje de adición. Para las mezclas de concreto sin adición de fibras, la identificación correspondiente será: F1 – I y para una mezcla con adición de fibra la identificación de la mezcla será: F1 – I – T – 1, donde:

F1: Fuente de material

I: Cemento hidráulico tipo I

T: Tipo de fibra (T, SF, N, AD, F)

1: Dosificación de la fibra en pesos diferentes de adición (1 a 5) medidos en gramos

Los criterios de confiabilidad y validez para los ensayos de laboratorio para la caracterización de los materiales (agregados y cemento), diseño de mezcla y

ensayos de laboratorio de las mezclas de concreto (módulo de rotura y módulo de elasticidad), están basados en las Especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS 2013), Las Normas Técnicas Colombianas y en las metodologías de diseño de mezclas de concreto.

La caracterización de los materiales, el diseño y verificación de la mezcla de concreto y los ensayos sobre las muestra fabricadas, se realizaron de acuerdo a los ensayos y métodos mostrados en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Criterios de validez para las mezclas de concreto

<b>ÍTEM</b>	<b>CRITERIO DE VALIDEZ</b>
Ensayos caracterización agregados	Normas INVIAS 2013
Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino	INV E-213
Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75µm en los agregados pétreos mediante lavado	INV E-214
Contenido de materia orgánica	INV E-212
Peso específico, masa unitaria suelta y apisonada	INV E-217
Absorción agregado fino	INV E-222
Absorción agregado grueso	INV E-223
Ensayos caracterización cemento	Normas INVIAS 2013 y NTC
Peso específico	INV E-307
Finura del cemento	NTC - 33
Diseño de mezcla	Método gráfico de Fuller y Thompson, ajustado por Bolomey
Muestras de concretos	Normas INVIAS 2013
Fabricación muestras de concreto	INV E-402
Toma de muestras de concreto	INV E-401
Tamaño muestras de concreto	INV E-402
Curado muestras de concreto	INV E-402
Transporte muestras de concreto	INV E-420
Asentamiento del concreto	INV E-404

Cuadro 6. (Continuación)

ÍTEM	CRITERIO DE VALIDEZ
Ensayos de laboratorio	Normas INVIAS 2013
Resistencia a la flexión	INV E-415
Módulo de elasticidad del concreto	INV E-424
Resistencia a la compresión	INV E-410

Fuente: Elaboración propia, 2017.

### 3.6 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS PETREOS Y DEL CEMENTO

Para el desarrollo de la investigación se procedió a aplicar los procedimientos descritos en las normas INV E-2013 y NTC.

### 3.7 RESULTADOS ESPERADOS DEL DISEÑO DE MEZCLA

- Determinación de la cantidad de cemento en volumen ( $m^3$ ) o en masa ( $Kg/m^3$ )
- Determinación de la cantidad de agua en volumen ( $m^3$ ) o en masa ( $Kg/m^3$ )
- Determinación de la cantidad de arena en volumen ( $m^3$ ) o en masa ( $Kg/m^3$ )
- Determinación de la cantidad de grava gruesa en volumen ( $m^3$ ) o en masa ( $Kg/m^3$ )

### 3.8 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE LAS MUESTRAS DE CONCRETO

Los resultados de laboratorio fueron procesados con base a la norma INV E-823-13 “Guía para el uso de cifras significativas y el redondeo en la verificación del cumplimiento de las especificaciones de construcción”.

**3.8.1 Verificación diseño de mezcla.** Con base a los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura, se verifica la resistencia de diseño de la mezcla patrón a la flexo – tracción, la cual debe ser equivalente a 4,00 MPa.

**3.8.2 Resultados de laboratorios ensayos de módulo de rotura.** Se determinan los valores de módulo de rotura de las muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas falladas a los 28 días de edad. En la Figura 10 se presenta la identificación de los especímenes prismáticos de la muestra patrón y se muestra un reporte típico obtenido del ensayo de módulo de rotura.



Los resultados del ensayo de laboratorio incluirán la siguiente información:

- Identificación del espécimen
- Ancho promedio del espécimen, en mm
- Altura promedio del espécimen, en mm
- Longitud de la luz libre, en mm
- Máxima carga aplicada, en N
- Historia del curado y medio ambiente del espécimen
- Módulo de rotura calculado, en MPa

Figura 10. Identificación de especímenes prismáticos y reporte ensayo módulo de rotura



Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

Las dimensiones del espécimen prismático fueron medidas al momento del ensayo y los demás datos necesarios para el ensayo, fueron registrados en el software utilizado para la realización del ensayo de módulo de rotura; los valores de módulo de rotura calculados se redondean a 0,05 MPa tal y como se describe en el numeral 8.1.6 de la norma INV E – 415-13.

En el Cuadro 7 se presentan las dimensiones de los especímenes prismáticos y los resultados del ensayo a flexión a los 28 días de edad para la muestra de concreto patrón.

Cuadro 7. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I	1	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	149,00	149,00	450,00	19,44	3,95
F1-I	2	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	152,00	450,00	21,48	4,25
F1-I	3	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	149,00	150,00	450,00	18,77	3,80
F1-I	4	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	149,00	450,00	19,69	4,00

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el Cuadro 8 se presentan las dimensiones de los especímenes prismáticos y los resultados del ensayo a flexión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Toc Fibra 500. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-T-1, F1-I-T-2, F1-I-T-3, F1-I-T-4 y F1-I-T-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 55,00g, 80,00g, 105,20g, 130,00g y 155,00g respectivamente.

Cuadro 8. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-T-1	1	101,60	22/10/2016	19/11/2016	28	152,00	150,00	450,00	23,45	4,65
F1-I-T-1	2	101,60	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	25,27	5,05
F1-I-T-1	3	101,60	22/10/2016	19/11/2016	28	152,00	149,00	450,00	24,58	4,90
F1-I-T-1	4	101,60	22/10/2016	19/11/2016	28	152,00	151,00	450,00	21,70	4,25
F1-I-T-2	1	95,25	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	24,67	4,95
F1-I-T-2	2	95,25	22/10/2016	19/11/2016	28	153,00	150,00	450,00	23,14	4,55
F1-I-T-2	3	95,25	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	25,45	5,10
F1-I-T-2	4	95,25	22/10/2016	19/11/2016	28	152,00	149,00	450,00	20,69	4,15
F1-I-T-3	1	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	26,08	5,20
F1-I-T-3	2	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	26,88	5,40
F1-I-T-3	3	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	152,00	450,00	31,06	6,15
F1-I-T-3	4	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	152,00	450,00	25,20	4,90
F1-I-T-4	1	69,85	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	152,00	450,00	28,56	5,55
F1-I-T-4	2	69,85	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	28,47	5,70
F1-I-T-4	3	69,85	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	25,89	5,20
F1-I-T-4	4	69,85	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	25,25	5,05
F1-I-T-5	1	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	148,00	150,00	450,00	27,41	5,55
F1-I-T-5	2	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	152,00	150,00	450,00	27,42	5,40
F1-I-T-5	3	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	153,00	152,00	450,00	23,44	4,50
F1-I-T-5	4	88,90	22/10/2016	19/11/2016	28	150,00	148,00	450,00	21,50	4,40

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 9 se presentan las dimensiones de los especímenes prismáticos y los resultados del ensayo a flexión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Tuf Strand SF. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-SF-1, F1-I-SF-2, F1-I-SF-3, F1-I-SF-4 y F1-I-SF-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 189,36g, 220,92g, 252,48g, 284,04g y 315,60g respectivamente.

Cuadro 9. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-SF-1	1	79,38	29/10/2016	26/11/2016	28	151,00	150,00	450,00	18,91	3,75
F1-I-SF-1	2	79,38	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	22,13	4,40
F1-I-SF-1	3	79,38	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	19,23	3,85
F1-I-SF-1	4	79,38	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	23,06	4,60
F1-I-SF-2	1	101,60	29/10/2016	26/11/2016	28	153,00	150,00	450,00	23,89	4,70
F1-I-SF-2	2	101,60	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	153,00	450,00	24,30	4,65
F1-I-SF-2	3	101,60	29/10/2016	26/11/2016	28	152,00	152,00	450,00	23,08	4,45
F1-I-SF-2	4	101,60	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	151,00	450,00	23,84	4,70
F1-I-SF-3	1	130,18	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	24,39	4,90
F1-I-SF-3	2	130,18	29/10/2016	26/11/2016	28	149,00	152,00	450,00	25,23	4,95
F1-I-SF-3	3	130,18	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	151,00	450,00	22,61	4,45
F1-I-SF-3	4	130,18	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	23,86	4,75
F1-I-SF-4	1	146,05	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	19,91	4,00
F1-I-SF-4	2	146,05	29/10/2016	26/11/2016	28	153,00	152,00	450,00	20,84	4,00
F1-I-SF-4	3	146,05	29/10/2016	26/11/2016	28	151,00	153,00	450,00	21,34	4,10
F1-I-SF-4	4	146,05	29/10/2016	26/11/2016	28	152,00	150,00	450,00	22,83	4,50
F1-I-SF-5	1	139,70	29/10/2016	26/11/2016	28	151,00	152,00	450,00	19,64	3,80
F1-I-SF-5	2	139,70	29/10/2016	26/11/2016	28	152,00	149,00	450,00	21,06	4,20
F1-I-SF-5	3	139,70	29/10/2016	26/11/2016	28	152,00	153,00	450,00	21,20	4,00
F1-I-SF-5	4	139,70	29/10/2016	26/11/2016	28	150,00	150,00	450,00	21,67	4,35

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 10 se presentan las dimensiones de los especímenes prismáticos y los resultados del ensayo a flexión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la microfibras Fiber Strand N. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-N-1, F1-I-N-2, F1-I-N-3, F1-I-N-4 y F1-I-N-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 65,00g, 95,00g, 125,00g, 155,00g y 185,00g respectivamente.

Cuadro 10. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-N-1	1	95,25	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	152,00	450,00	20,58	4,05
F1-I-N-1	2	95,25	21/02/2017	21/03/2017	28	151,00	152,00	450,00	22,14	4,30
F1-I-N-1	3	95,25	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	151,00	450,00	21,88	4,35
F1-I-N-1	4	95,25	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	153,00	450,00	20,89	4,10
F1-I-N-2	1	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	153,00	450,00	23,59	4,65
F1-I-N-2	2	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	152,00	152,00	450,00	23,34	4,50
F1-I-N-2	3	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	151,00	450,00	22,03	4,40
F1-I-N-2	4	101,60	21/02/2017	21/03/2017	28	152,00	153,00	450,00	24,36	4,60
F1-I-N-3	1	88,90	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	152,00	450,00	20,67	4,10
F1-I-N-3	2	88,90	21/02/2017	21/03/2017	28	151,00	151,00	450,00	19,05	3,75
F1-I-N-3	3	88,90	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	150,00	450,00	19,84	3,95
F1-I-N-3	4	88,90	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	152,00	450,00	22,45	4,45

Cuadro 10. (Continuación)

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-N-4	1	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	149,00	152,00	450,00	21,67	4,35
F1-I-N-4	2	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	152,00	152,00	450,00	23,70	4,55
F1-I-N-4	3	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	153,00	450,00	22,84	4,50
F1-I-N-4	4	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	153,00	150,00	450,00	22,92	4,40
F1-I-N-5	1	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	150,00	152,00	450,00	22,36	4,40
F1-I-N-5	2	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	151,00	152,00	450,00	22,22	4,35
F1-I-N-5	3	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	152,00	151,00	450,00	22,55	4,35
F1-I-N-5	4	76,20	21/02/2017	21/03/2017	28	152,00	151,00	450,00	20,38	3,95

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 11 se presentan las dimensiones de los especímenes prismáticos y los resultados del ensayo a flexión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la microfibras Sika Fiber AD. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-AD-1, F1-I-AD-2, F1-I-AD-3, F1-I-AD-4 y F1-I-AD-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 55,00g, 80,00g, 105,20g, 130,00g y 155,00g respectivamente.

Cuadro 11. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-AD-1	1	114,30	05/11/2016	03/12/2016	28	151,00	154,00	450,00	22,64	4,35
F1-I-AD-1	2	114,30	05/11/2016	03/12/2016	28	151,00	153,00	450,00	24,70	4,80
F1-I-AD-1	3	114,30	05/11/2016	03/12/2016	28	152,00	153,00	450,00	24,05	4,60
F1-I-AD-1	4	114,30	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	20,89	4,00
F1-I-AD-2	1	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	23,27	4,55
F1-I-AD-2	2	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	152,00	450,00	21,81	4,30
F1-I-AD-2	3	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	-	-	-	-	-
F1-I-AD-2	4	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	151,00	153,00	450,00	29,97	5,70
F1-I-AD-3	1	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	150,00	450,00	21,78	4,35
F1-I-AD-3	2	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	150,00	450,00	20,31	4,05
F1-I-AD-3	3	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	151,00	450,00	21,20	4,20
F1-I-AD-3	4	120,65	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	152,00	450,00	23,66	4,60
F1-I-AD-4	1	133,35	05/11/2016	03/12/2016	28	153,00	149,00	450,00	20,83	4,05
F1-I-AD-4	2	133,35	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	152,00	450,00	29,02	5,75
F1-I-AD-4	3	133,35	05/11/2016	03/12/2016	28	153,00	154,00	450,00	26,55	4,95
F1-I-AD-4	4	133,35	05/11/2016	03/12/2016	28	153,00	151,00	450,00	25,41	4,90
F1-I-AD-5	1	139,70	05/11/2016	03/12/2016	28	150,00	150,00	450,00	26,17	5,25
F1-I-AD-5	2	139,70	05/11/2016	03/12/2016	28	152,00	151,00	450,00	26,58	5,15
F1-I-AD-5	3	139,70	05/11/2016	03/12/2016	28	149,00	153,00	450,00	24,20	4,80
F1-I-AD-5	4	139,70	05/11/2016	03/12/2016	28	153,00	151,00	450,00	24,83	4,80

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 12 se presentan las dimensiones de los especímenes prismáticos y los resultados del ensayo a flexión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Sika Fiber Force PP/PE-700/55.

Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-F-1, F1-I-F-2, F1-I-F-3, F1-I-F-4 y F1-I-F-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 189,36g, 220,92g, 252,84g, 284,04g y 315,60g respectivamente.

Cuadro 12. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

Mezcla	Muestra	Asentamiento (mm)	Fecha toma	Fecha de falla	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-F-1	1	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	151,00	152,00	450,00	21,81	4,25
F1-I-F-1	2	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	22,91	4,50
F1-I-F-1	3	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	151,00	153,00	450,00	20,78	4,00
F1-I-F-1	4	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	23,16	4,45
F1-I-F-2	1	88,90	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	151,00	450,00	22,16	4,40
F1-I-F-2	2	88,90	14/11/2016	12/12/2016	28	152,00	151,00	450,00	22,08	4,25
F1-I-F-2	3	88,90	14/11/2016	12/12/2016	28	149,00	153,00	450,00	21,44	4,25
F1-I-F-2	4	88,90	14/11/2016	12/12/2016	28	152,00	151,00	450,00	22,48	4,40
F1-I-F-3	1	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	152,00	153,00	450,00	21,28	4,05
F1-I-F-3	2	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	152,00	450,00	25,36	5,00
F1-I-F-3	3	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	19,50	3,80
F1-I-F-3	4	101,60	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	22,14	4,25
F1-I-F-4	1	69,85	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	19,17	3,75
F1-I-F-4	2	69,85	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	20,94	4,10
F1-I-F-4	3	69,85	14/11/2016	12/12/2016	28	153,00	153,00	450,00	24,69	4,65
F1-I-F-4	4	69,85	14/11/2016	12/12/2016	28	150,00	153,00	450,00	19,39	3,75
F1-I-F-5	1	95,25	14/11/2016	12/12/2016	28	151,00	153,00	450,00	23,67	4,60
F1-I-F-5	2	95,25	14/11/2016	12/12/2016	28	151,00	153,00	450,00	19,98	3,85
F1-I-F-5	3	95,25	14/11/2016	12/12/2016	28	151,00	153,00	450,00	20,64	4,00
F1-I-F-5	4	95,25	14/11/2016	12/12/2016	28	152,00	153,00	450,00	24,69	4,70

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 11 se presenta un registro fotográfico de las fallas a flexión a los 28 días de edad de algunos especímenes prismáticos de concreto con y sin adición de fibras sintéticas.

Figura 11. Fallas a flexión de especímenes prismáticos



Rotura a flexión espécimen prismático muestra patrón

Fallas de vigas prismáticas muestra patrón



Figura 11. (Continuación)



Rotura a flexión espécimen prismático muestra F1-I-T-5 (Toc fibra 500)



Fallas de vigas prismáticas muestra F1-I-T-5



Rotura a flexión espécimen prismático muestra F1-I-SF-3 (Tuf Strand SF)



Fallas de vigas prismáticas muestra F1-I-SF-3



Rotura a flexión espécimen prismático muestra F1-I-N-2 (Fiber Strand N)



Fallas de vigas prismáticas muestra F1-I-N-2

Figura 11. (Continuación)

	
<p>Rotura a flexión espécimen prismático muestra F1-I-AD-3 (Sika Fiber AD)</p>	<p>Fallas de vigas prismáticas muestra F1-I-AD-3</p>
	
<p>Rotura a flexión espécimen prismático muestra F1-I-F-5 (Sika Fiber Force PP/PE-700/55)</p>	<p>Fallas de vigas prismáticas muestra F1-I-F-5</p>

Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

El tipo de fibra, la relación diámetro/longitud, la dispersión, la dosificación y en especial la orientación de las fibras sintéticas respecto al plano de falla del espécimen de concreto, influyen directamente en los resultados de resistencia a flexión del concreto.

### 3.8.3 Resultados de laboratorios ensayos de resistencia a la compresión.

Se determina la resistencia última de cada una de las muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas mediante el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad a dos especímenes cilíndricos de concreto de cada muestra fabricada, tal y como se describe en el numeral 6.2 de la norma INV E-424-13. Los valores obtenidos de resistencia última a la compresión de las muestras cilíndricas se utilizan para determinar el 40% de su resistencia, el cual será utilizado para realizar los ensayos de módulo de elasticidad de concreto de cada muestra de concreto y así obtener el valor de los respectivos módulos de elasticidad. En la Figura 12 se presenta la identificación de los especímenes

cilíndricos de la muestra patrón y se muestra un reporte típico obtenido del ensayo de resistencia a la compresión. Los resultados del ensayo de laboratorio incluirán la siguiente información:

- Identificación del espécimen
- Dimensiones del espécimen, en mm
- Historia del curado y medio ambiente del espécimen
- Resistencia a la compresión calculada, en MPa

Figura 12. Identificación de especímenes cilíndricos y reporte ensayo resistencia a la compresión



Identificación especímenes cilíndricos para ensayo de resistencia a la compresión

Reporte de laboratorio para ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

Las dimensiones del espécimen cilíndrico fueron medidas al momento del ensayo y el diámetro promedio del cilindro se redondea a los 0,25mm más cercano como se define en el numeral 5.2 de la norma INV E-410-13, los demás datos necesarios para el ensayo fueron registrados en el software utilizado para la realización del ensayo de resistencia a la compresión; los valores de resistencia última calculados se redondean a 0,10 MPa tal y como se describe en el numeral 7.1 de la norma INV E – 410-13.

En el Cuadro 13 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad para la muestra de concreto patrón.

Cuadro 13. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m³)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
M1-1	1	28	152,75	307,33	2,01	12,80	2270,00	485,60	26,50
M1-2	2	28	151,75	305,00	2,01	12,70	2300,00	433,90	24,00

Fuente: Elaboración propia, 2017.



En el Cuadro 14 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Toc Fibra 500. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-T-1, F1-I-T-2, F1-I-T-3, F1-I-T-4 y F1-I-T-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 55,00g, 80,00g, 105,20g, 130,00g y 155,00g respectivamente.

Cuadro 14. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-T-1	1	28	152,00	304,00	2,00	12,70	2300,00	459,10	25,30
F1-I-T-1	2	28	153,00	302,67	1,98	12,90	2320,00	491,40	26,70
F1-I-T-2	1	28	153,00	307,67	2,01	13,10	2320,00	283,90	15,40
F1-I-T-2	2	28	153,50	307,67	2,00	13,00	2290,00	436,70	23,60
F1-I-T-3	1	28	151,75	305,33	2,01	12,40	2250,00	427,40	23,60
F1-I-T-3	2	28	152,00	304,33	2,00	12,70	2300,00	414,90	22,90
F1-I-T-4	1	28	153,50	303,00	1,97	13,10	2340,00	563,30	30,40
F1-I-T-4	2	28	153,50	305,00	1,99	13,30	2360,00	560,10	30,30
F1-I-T-5	1	28	152,75	305,00	2,00	12,80	2290,00	601,90	32,80
F1-I-T-5	2	28	153,00	306,34	2,00	13,00	2310,00	575,80	31,30

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 15 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Tuf Strand SF. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-SF-1, F1-I-SF-2, F1-I-SF-3, F1-I-SF-4 y F1-I-SF-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 189,36g, 220,92g, 252,48g, 284,04g y 315,60g respectivamente.

Cuadro 15. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-SF-1	1	28	152,50	303,67	1,99	12,90	2320,00	555,80	30,40
F1-I-SF-1	2	28	153,25	304,00	1,98	13,00	2320,00	586,20	31,80
F1-I-SF-2	1	28	153,50	302,67	1,97	13,00	2320,00	557,10	30,10
F1-I-SF-2	2	28	153,50	298,33	1,94	12,90	2340,00	723,50	39,10
F1-I-SF-3	1	28	152,00	302,33	1,99	12,70	2310,00	503,00	27,70
F1-I-SF-3	2	28	152,75	304,67	1,99	12,90	2310,00	538,00	29,40
F1-I-SF-4	1	28	153,00	304,00	1,99	12,90	2310,00	493,20	26,80
F1-I-SF-4	2	28	153,00	304,33	1,99	12,90	2300,00	381,40	20,70

Cuadro 15. (Continuación)

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-SF-5	1	28	152,75	305,00	2,00	12,90	2300,00	324,00	17,70
F1-I-SF-5	2	28	153,00	304,00	1,99	13,00	2330,00	349,90	19,00

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 16 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la microfibras Fiber Strand N. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-N-1, F1-I-N-2, F1-I-N-3, F1-I-N-4 y F1-I-N-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 65,00g, 95,00g, 125,00g, 155,00g y 185,00g respectivamente.

Cuadro 16. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-N-1	1	28	151,75	303,00	2,00	12,10	2200,00	470,70	26,00
F1-I-N-1	2	28	153,25	305,66	1,99	13,10	2330,00	543,30	29,50
F1-I-N-2	1	28	153,00	306,00	2,00	12,80	2270,00	538,60	29,30
F1-I-N-2	2	28	152,50	306,33	2,01	12,90	2310,00	516,40	28,30
F1-I-N-3	1	28	153,00	303,33	1,98	12,80	2300,00	509,00	27,70
F1-I-N-3	2	28	153,00	304,00	1,99	12,80	2290,00	507,80	27,60
F1-I-N-4	1	28	152,75	303,33	1,99	12,80	2300,00	468,40	25,60
F1-I-N-4	2	28	153,50	304,66	1,98	13,10	2320,00	465,90	25,20
F1-I-N-5	1	28	152,25	304,33	2,00	12,50	2260,00	473,20	26,00
F1-I-N-5	2	28	153,50	306,00	1,99	12,90	2280,00	476,50	25,70

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 17 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la microfibras Sika Fiber AD. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-AD-1, F1-I-AD-2, F1-I-AD-3, F1-I-AD-4 y F1-I-AD-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 55,00g, 80,00g, 105,20g, 130,00g y 155,00g respectivamente.

Cuadro 17. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-AD-1	1	28	153,00	303,67	1,98	13,00	2330,00	606,40	33,00
F1-I-AD-1	2	28	153,50	293,67	1,91	12,70	2340,00	635,90	34,40

Cuadro 17. (Continuación)

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-AD-2	1	28	152,25	305,67	2,01	12,80	2300,00	495,80	27,20
F1-I-AD-2	2	28	152,25	305,67	2,01	12,90	2320,00	599,20	32,90
F1-I-AD-3	1	28	153,00	305,67	2,00	12,90	2300,00	516,10	28,10
F1-I-AD-3	2	28	153,25	303,00	1,98	12,90	2310,00	424,80	23,00
F1-I-AD-4	1	28	153,00	303,67	1,98	13,10	2350,00	556,70	30,30
F1-I-AD-4	2	28	153,00	303,67	1,98	13,10	2350,00	621,60	33,80
F1-I-AD-5	1	28	152,00	304,67	2,00	12,80	2310,00	563,50	31,10
F1-I-AD-5	2	28	152,75	304,00	1,99	12,90	2310,00	609,20	33,20

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 18 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Sika Fiber Force PP/PE-700/55. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-F-1, F1-I-F-2, F1-I-F-3, F1-I-F-4 y F1-I-F-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 189,36g, 220,92g, 252,84g, 284,04g y 315,60g respectivamente.

Cuadro 18. Resultados ensayo resistencia a la compresión muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)
F1-I-F-1	1	28	151,75	305,67	2,01	12,20	2210,00	525,30	29,00
F1-I-F-1	2	28	151,75	303,67	2,00	12,70	2310,00	484,70	26,80
F1-I-F-2	1	28	153,25	303,67	1,98	12,90	2300,00	608,30	33,00
F1-I-F-2	2	28	152,00	302,67	1,99	12,70	2310,00	506,40	27,90
F1-I-F-3	1	28	153,25	305,33	1,99	13,10	2320,00	567,90	30,80
F1-I-F-3	2	28	152,75	304,33	1,99	13,00	2330,00	298,60	16,30
F1-I-F-4	1	28	152,75	302,67	1,98	12,90	2330,00	567,60	31,00
F1-I-F-4	2	28	153,00	304,33	1,99	12,90	2310,00	630,50	34,30
F1-I-F-5	1	28	152,25	304,33	2,00	12,80	2310,00	578,30	31,80
F1-I-F-5	2	28	153,00	304,33	1,99	12,90	2310,00	578,70	31,50

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 13 se presenta un registro fotográfico de las fallas a compresión a los 28 días de edad de algunos especímenes cilíndricos de concreto con y sin adición de fibras sintéticas. Los tipos de fallas se determinaron con base a la figura 410-3 "Esquemas de patrones de falla típicos" de la norma INV E-410-13 del INVIAS.

Figura 13. Fallas a compresión simple de especímenes cilíndricos

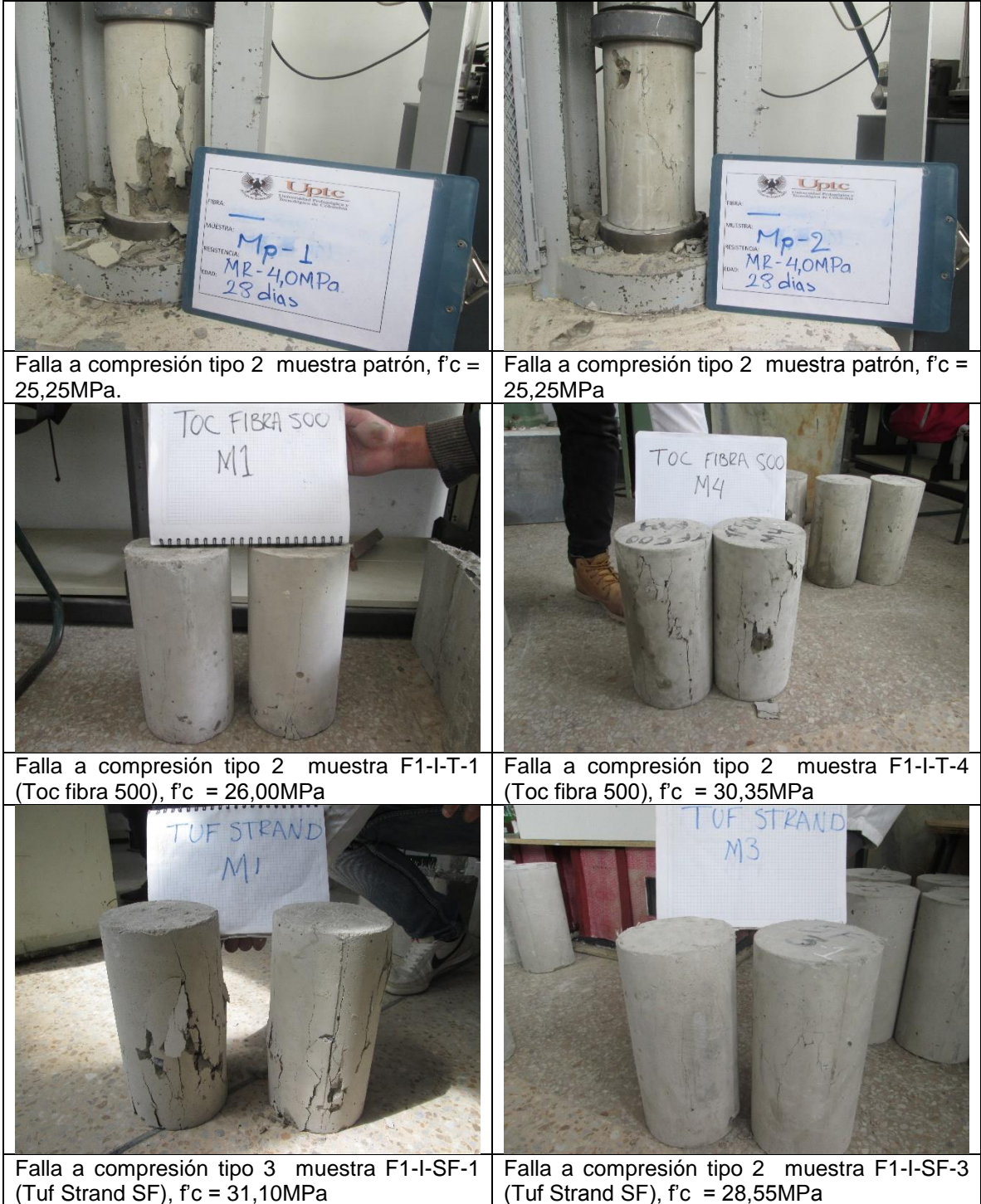




Figura 13. (Continuación)

<p>Falla a compresión tipo 3 muestra F1-I-N-1 (Fiber Strand N), <math>f_c = 27,75\text{MPa}</math></p>	<p>Falla a compresión tipo 2 muestra F1-I-N-5 (Fiber Strand N), <math>f_c = 25,85\text{MPa}</math></p>
<p>Falla a compresión tipo 3 muestra F1-I-AD-1 (Sika Fiber AD), <math>f_c = 33,70\text{MPa}</math></p>	<p>Falla a compresión tipo 3 muestra F1-I-AD-5 (Sika Fiber AD), <math>f_c = 32,15\text{MPa}</math></p>
<p>Falla a compresión tipo 3 muestra F1-I-F-2 (Sika Fiber Force PP/PE-700/55), <math>f_c = 30,45\text{MPa}</math></p>	<p>Falla a compresión tipo 3 muestra F1-I-F-5 (Sika Fiber Force PP/PE-700/55), <math>f_c = 31,65\text{MPa}</math></p>


Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

El tipo de fibra, la relación diámetro/longitud, la dispersión, la dosificación y en especial la orientación de las fibras sintéticas respecto al plano de falla del espécimen de concreto, pueden influir directamente en los resultados de resistencia a compresión del concreto. Sin importar el tipo de falla que presente el concreto, la incorporación de fibras sintéticas dentro de la matriz de concreto, además de mejorar las propiedades tanto en estado plástico como endurecido, ayudan a evitar fallas súbitas del concreto, ayudando a mantener las partículas unidas después de la falla.

**3.8.4 Resultados de laboratorios ensayos de módulo de elasticidad.** Se determina los valores de módulo de elasticidad de las muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas falladas a los 28 días de edad. En la Figura 14 se presenta la identificación de los especímenes cilíndricos de la muestra patrón y se muestra un reporte típico obtenido del ensayo de módulo de elasticidad. Los resultados del ensayo de laboratorio incluirán la siguiente información:

- Identificación del espécimen
- Dimensiones del espécimen, en mm
- Historia del curado y medio ambiente del espécimen
- Módulo de elasticidad calculado, en MPa

Figura 14. Identificación de especímenes cilíndricos y reporte ensayo módulo de elasticidad



ANÁLISIS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACION DE POISSON										
PROPIEDADES		ENSAYO			DATOS			RESULTADOS		
ANÁLISIS DE RESULTADOS										
CICLO DE CARGA	DEF. UNIT. VERTIC. 90 MILL (%)	DEF. UNIT. HORIZ. 90 MILL (%)	S1 ESFUERZO 90 MILL MPa	DEF. UNIT. VERTIC. PRODUCCION POR S2 (%)	DEF. UNIT. HORIZ. PRODUCCION POR S2 (%)	S2 ESFUERZO 40 % MPa	E MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)	ν RELACION DE POISSON	DESCARTAR RESULTADO	
0	--	--	--	--	--	--	--	--	<input type="checkbox"/>	
1	0.00505	-5.00000E-5	1.86717	0.01627	0.00435	5.49087	32296.79102	0.39216	<input type="checkbox"/>	
2	0.00505	0.00011	1.90153	0.01616	0.00424	5.47169	32134.65430	0.37174	<input type="checkbox"/>	
3	0.00505	3.00000E-5	1.92205	0.01610	0.00432	5.47035	32111.31250	0.38824	<input type="checkbox"/>	
4	0.00505	--	1.92741	0.01621	0.00440	5.47660	31902.77734	0.35427	<input type="checkbox"/>	
5	0.00510	0.00016	1.92205	0.01613	0.00440	5.46901	32157.58867	0.38441	<input type="checkbox"/>	

Modulo de elasticidad: **32100,58 MPa**

Modulo de Poisson: **0,3862**

Observaciones:

Identificación especímenes cilíndricos para ensayo de módulo de elasticidad

Reporte de laboratorio para ensayo módulo de elasticidad

Fuente: Registro fotográfico propio, 2017.

Las dimensiones del espécimen cilíndrico fueron medidas al momento del ensayo y los demás datos necesarios para el ensayo, fueron registrados en el software utilizado para la realización del ensayo de módulo de elasticidad; los valores de

módulo de elasticidad se calculan con aproximación a 200 MPa tal y como se describe en el numeral 7.1 de la norma INV E – 424-13.

En el Cuadro 19 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de módulo de elasticidad a los 28 días de edad para la muestra de concreto patrón.

**Cuadro 19. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón**

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
M1-3	3	0,25	37400,00	28	151,75	303,66	2,00	12,62	2300,00
M1-4	4	0,32	32200,00	28	153,50	305,66	1,99	13,07	2310,00

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el cuadro 20 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de módulo de elasticidad a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Toc Fibra 500. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-T-1, F1-I-T-2, F1-I-T-3, F1-I-T-4 y F1-I-T-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 55,00g, 80,00g, 105,20g, 130,00g y 155,00g respectivamente.

**Cuadro 20. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500**

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	RELACIÓN L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
F1-I-T-1	3	0,24	31000,00	28	152,50	303,67	1,99	12,50	2250
F1-I-T-1	4	0,24	34400,00	28	151,50	303,00	2,00	12,40	2270
F1-I-T-2	3	0,21	35800,00	28	153,50	305,33	1,99	12,80	2270
F1-I-T-2	4	0,35	37800,00	28	152,00	306,00	2,01	12,80	2310
F1-I-T-3	3	0,24	34000,00	28	152,25	302,00	1,98	12,70	2310
F1-I-T-3	4	0,17	39000,00	28	151,75	303,00	2,00	12,40	2260
F1-I-T-4	3	0,26	31800,00	28	151,50	304,33	2,01	12,50	2280
F1-I-T-4	4	0,32	36200,00	28	152,25	304,00	2,00	12,70	2300
F1-I-T-5	3	0,34	38400,00	28	152,50	304,00	1,99	12,60	2270
F1-I-T-5	4	0,39	32200,00	28	151,50	304,00	2,01	12,70	2320

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 21 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de módulo de elasticidad a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Tuf Strand SF. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-SF-1, F1-I-SF-2, F1-I-SF-3, F1-I-SF-4 y F1-I-SF-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 189,36g, 220,92g, 252,48g, 284,04g y 315,60g respectivamente.

Cuadro 21. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
F1-I-SF-1	3	0,16	41400,00	28	152,00	303,67	2,00	12,70	2300,00
F1-I-SF-1	4	0,32	42200,00	28	153,50	304,00	1,98	13,10	2330,00
F1-I-SF-2	3	0,65	56200,00	28	153,25	303,00	1,98	13,00	2320,00
F1-I-SF-2	4	0,18	39600,00	28	151,75	302,67	1,99	12,60	2300,00
F1-I-SF-3	3	0,26	40400,00	28	151,75	302,67	1,99	12,60	2300,00
F1-I-SF-3	4	0,22	32200,00	28	152,00	302,67	1,99	12,70	2310,00
F1-I-SF-4	3	0,17	40600,00	28	153,00	304,67	1,99	12,90	2310,00
F1-I-SF-4	4	0,31	37800,00	28	153,00	304,33	1,99	13,00	2320,00
F1-I-SF-5	3	0,35	46000,00	28	153,00	305,33	2,00	12,90	2300,00
F1-I-SF-5	4	0,17	45000,00	28	153,25	305,00	1,99	13,00	2310,00

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 22 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de módulo de elasticidad a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la microfibra Fiber Strand N. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-N-1, F1-I-N-2, F1-I-N-3, F1-I-N-4 y F1-I-N-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 65,00g, 95,00g, 125,00g, 155,00g y 185,00g respectivamente.

Cuadro 22. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
F1-I-N-1	3	0,40	37600,00	28	153,25	306,00	2,00	12,80	2270,00
F1-I-N-1	4	0,28	37000,00	28	153,50	304,66	1,98	12,90	2290,00
F1-I-N-2	3	0,30	33400,00	28	152,75	306,66	2,01	12,78	2270,00
F1-I-N-2	4	0,29	32600,00	28	153,00	307,33	2,01	12,80	2260,00
F1-I-N-3	3	0,17	31200,00	28	153,00	303,33	1,98	12,80	2300,00
F1-I-N-3	4	-	-	-	-	-	-	-	-
F1-I-N-4	3	0,34	35600,00	28	153,00	306,33	2,00	12,80	2270,00
F1-I-N-4	4	0,22	31800,00	28	152,75	306,66	2,01	12,70	2260,00
F1-I-N-5	3	0,17	35400,00	28	151,75	305,20	2,01	12,50	2260,00
F1-I-N-5	4	0,27	46200,00	28	153,50	305,00	1,99	12,90	2290,00

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 23 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de módulo de elasticidad a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la microfibra Sika Fiber AD. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-AD-1, F1-I-AD-2, F1-I-AD-3, F1-I-AD-4 y F1-I-AD-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 55,00g, 80,00g, 105,20g, 130,00g y 155,00g respectivamente.



Cuadro 23. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
F1-I-AD-1	3	0,21	38800,00	28	152,00	304,00	2,00	12,60	2290,00
F1-I-AD-1	4	0,24	42800,00	28	152,75	305,00	2,00	12,80	2290,00
F1-I-AD-2	3	0,43	45200,00	28	152,50	304,67	2,00	12,80	2300,00
F1-I-AD-2	4	0,20	38400,00	28	151,50	305,67	2,02	12,70	2310,00
F1-I-AD-3	3	0,22	35800,00	28	152,25	302,67	1,99	12,50	2270,00
F1-I-AD-3	4	0,32	40400,00	28	152,75	304,67	1,99	12,80	2290,00
F1-I-AD-4	3	0,25	39200,00	28	152,25	304,00	2,00	12,90	2330,00
F1-I-AD-4	4	0,42	44000,00	28	153,25	304,33	1,99	12,90	2300,00
F1-I-AD-5	3	0,32	38200,00	28	153,75	305,67	1,99	12,80	2260,00
F1-I-AD-5	4	0,18	41600,00	28	152,25	305,00	2,00	12,70	2290,00

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 24 se presentan las dimensiones de los especímenes cilíndricos y los resultados del ensayo de módulo de elasticidad a los 28 días de edad para la muestra de concreto modificada con adición de la macrofibra Sika Fiber Force PP/PE-700/55. Con base a la denominación de cada una de las mezcla de concreto, se tiene que para las mezclas F1-I-F-1, F1-I-F-2, F1-I-F-3, F1-I-F-4 y F1-I-F-5 presentan una incorporación de fibra en su matriz de concreto de 189,36g, 220,92g, 252,84g, 284,04g y 315,60g respectivamente.

Cuadro 24. Resultados ensayo módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Edad (días)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Relación L/D	Masa (Kg)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
F1-I-F-1	3	0,23	39600,00	28	152,25	304,67	2,00	12,70	2290,00
F1-I-F-1	4	0,23	38000,00	28	152,00	304,33	2,00	12,77	2310,00
F1-I-F-2	3	0,17	38400,00	28	153,00	303,67	1,98	12,90	2310,00
F1-I-F-2	4	0,27	40000,00	28	152,25	303,33	1,99	12,80	2320,00
F1-I-F-3	3	0,41	42800,00	28	153,50	304,33	1,98	13,00	2310,00
F1-I-F-3	4	0,19	36400,00	28	153,00	305,00	1,99	13,10	2340,00
F1-I-F-4	3	0,27	40800,00	28	153,00	303,33	1,98	12,90	2310,00
F1-I-F-4	4	0,26	37000,00	28	151,75	303,00	2,00	12,70	2320,00
F1-I-F-5	3	0,37	38200,00	28	151,75	305,00	2,01	12,70	2300,00
F1-I-F-5	4	0,33	35200,00	28	153,50	295,33	1,92	12,60	2310,00

Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### **4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS**

En los resultados de los ensayos de concreto, se puede presentar dispersión en los resultados de las muestras falladas, debido a la variabilidad de los materiales utilizados en la fabricación de los especímenes y en los procesos de muestreo y ensayo de las muestras de concreto. Durante el proceso de fabricación de las muestras se pudo presentar cierto grado de variabilidad en la toma de los especímenes de concreto, producto del estado anímico de quien toma la muestra, falta de experticia, personal transitorio durante cada proceso de mezclado y estado del clima al momento de la fabricación, de igual manera, el proceso de curado y transporte de las muestras al laboratorio influyen en los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados a las muestras de concreto, lo cual, se puede evidenciar en datos atípicos en los resultados de los ensayos de laboratorio. Teniendo en cuenta lo anterior, se decidió realizar la fabricación de 4 especímenes prismáticos y 4 cilíndricos por cada muestra fabricada, con el fin de prever estas situaciones y cualquier pérdida de información durante el ensayo, y así obtener como mínimo tres ensayos de resistencia para los especímenes prismáticos por cada muestra fabricada, y dos ensayos de resistencia para los especímenes cilíndricos.

Para la determinación del módulo de rotura del concreto se cumple con lo estipulado en el numeral 500.5.2.7.3 “Resistencia” del artículo 500-13 “Pavimento de concreto hidráulico” del INVIAS, donde el promedio aritmético de los tres especímenes prismáticos de cada muestra fabricada se reporta como el valor de módulo de rotura y para la determinación del módulo de elasticidad se cumple con lo establecido en la norma INV E-424-13, donde el promedio aritmético de los dos especímenes cilíndricos se reporta como el valor del módulo de elasticidad, adicionalmente mediante el promedio aritmético de los dos especímenes cilíndricos restantes de cada muestra fabricada se obtiene el valor de la resistencia última a la compresión de las muestras de concreto cumpliendo con lo estipulado en la NSR -10 en el numeral C.5.6.3.3.

Todos los especímenes de concreto se fallaron a los 28 días de edad y los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos y caculos realizados, se reportan con la precisión indicada en la norma INV E-823 del INVIAS.

##### **4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA ACEPTACIÓN DE RESULTADOS DE RESISTENCIA**

A continuación se presenta una muestra de cálculo del análisis estadístico para aceptar o rechazar el valor obtenido del ensayo de resistencia realizado a cada uno de los especímenes de concreto de las muestras fabricadas, siguiendo la metodología descrita en el artículo 107-13 “Control y aceptación de los trabajos”

del INVIAS. Para la muestra de cálculo se utilizan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura de la muestra de concreto referenciada como FI-I-T-1, la cual se trata de una muestra de concreto con adición de 55,00gr de Toc Fibra 500 (macro fibra de polipropileno fibrilada). En el Cuadro 25, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura de la muestra FI-I-T-1, los valores calculados de módulo de rotura de cada uno de los especímenes fallados se redondean a 0,05MPa.

Cuadro 25. Resultados ensayo módulo de rotura muestra FI-I-T-1

Mezcla	Muestra	Fibra (gr)	Edad (días)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Luz libre (mm)	Carga (KN)	Módulo rotura (MPa)	Módulo Rotura (MPa)
F1-I-T-1	1	55,00	28	152,00	150,00	450,00	23,45	4,63	4,65
F1-I-T-1	2	55,00	28	150,00	150,00	450,00	25,27	5,05	5,05
F1-I-T-1	3	55,00	28	152,00	149,00	450,00	24,58	4,92	4,90
F1-I-T-1	4	55,00	28	152,00	151,00	450,00	21,70	4,23	4,25

Fuente: Elaboración propia, 2018.

**4.1.1 Promedio de la muestra.** El promedio o valor medio de los resultados de resistencia obtenidos para los especímenes prismáticos de concretos de la muestra FI-I-T-1, se calcula de la siguiente manera:

$$V_m = \frac{\sum V_i}{n}$$

Donde:

$V_m$ : Valor promedio de las resistencias obtenidas, MPa

$V_i$ : Valor individual de resistencia obtenida para cada espécimen prismático, MPa

$n$ : Número de especímenes fallados

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$V_m = \frac{(4,65 + 5,05 + 4,90 + 4,25)}{4,00} = 4,71MPa$$

**4.1.2 Desviación estándar de la muestra.** La desviación estándar de los resultados de resistencia de los especímenes de concreto de la muestra FI-I-T-1, se calcula de la siguiente manera:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (V_i - V_m)^2}{n - 1}}$$

Donde:

$s$ : Desviación estándar de las resistencias obtenidas, MPa

$V_m$ : Valor promedio de las resistencias obtenidas, MPa

$V_i$ : Valor individual de resistencia obtenida para cada espécimen prismático, MPa  
 $n$ : Número de especímenes fallados

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$s = \sqrt{\frac{(4,65 - 4,71)^2 + (5,05 - 4,71)^2 + (4,90 - 4,71)^2 + (4,25 - 4,71)^2}{4,00 - 1,00}} = 0,35MPa$$

**4.1.3 Promedio estimado del lote con un grado de confiabilidad dado.** Se determina el intervalo de confianza, en el que con una probabilidad dada se encuentra el valor promedio de las resistencias obtenidas y se fijan los límites superior e inferior del intervalo de resistencia con el fin de aceptar o rechazar el resultado obtenido del ensayo de resistencia realizado a cada uno de los especímenes de concreto. Los límites inferior y superior del intervalo de confianza para los resultados de resistencia obtenidos de los ensayos realizados a los especímenes de concreto de la muestra FI-I-T-1, se determinan de la siguiente manera:

- Límite inferior,  $V_I(p)$

$$V_I(p) = V_m - k(p) * s$$

- Límite superior,  $V_{I, sup}(p)$

$$V_{I, sup}(p) = V_m + k(p) * s$$

Donde:

$V_I(p)$ : Límite inferior del intervalo de confianza para una probabilidad dada, MPa

$V_{I, sup}(p)$ : Límite superior del intervalo de confianza para una probabilidad dada, MPa

$p$ : Probabilidad dada, %

$V_m$ : Valor promedio de las resistencias obtenidas, MPa

$k(p)$ : Factor que establece los límites del intervalo de confianza

$s$ : Desviación estándar de las resistencias obtenidas, MPa

En el numeral 500.5.2.7.3.2 “Criterio de aceptación de la resistencia a la flexión del concreto” del artículo 500-13 “Pavimento de concreto hidráulico” se establecen los diferentes niveles de calidad en función de las resistencias obtenidas de los ensayos realizados a las muestras de concreto dentro de los límites de la especificación. El nivel de calidad definido para las muestras falladas es el nivel de aceptación a satisfacción, donde el porcentaje estimado de la resistencia dentro de los límites de la especificación (PDL) de la muestra es igual o superior al 90%, por lo tanto, el intervalo de confianza se determina con una probabilidad del 90%.

Teniendo en cuenta que la muestra de concreto referenciada como FI-I-T-1 tiene cuatro especímenes, se obtiene del Cuadro 26 el valor del factor k para n=4 resultados de resistencia y un 90% de probabilidad, el cual equivale a 0,819.

Cuadro 26. Factor que establece los límites del intervalo de confianza, k

Probabilidad, p	NÚMERO DE RESULTADOS, n											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
60%	0,138	0,121	0,109	0,100	0,093	0,087	0,083	0,078	0,075	0,072	0,069	0,067
70%	0,292	0,254	0,228	0,209	0,194	0,182	0,172	0,163	0,156	0,149	0,144	0,139
75%	0,382	0,331	0,297	0,271	0,251	0,235	0,222	0,211	0,201	0,193	0,185	0,179
80%	0,489	0,421	0,375	0,342	0,317	0,296	0,279	0,265	0,253	0,242	0,233	0,224
85%	0,625	0,532	0,472	0,429	0,396	0,369	0,348	0,330	0,314	0,300	0,289	0,278
90%	0,819	0,686	0,603	0,544	0,500	0,466	0,437	0,414	0,394	0,376	0,361	0,347
95%	1,177	0,953	0,823	0,734	0,670	0,620	0,580	0,546	0,518	0,494	0,473	0,455
99%	2,270	1,676	1,374	1,188	1,060	0,965	0,892	0,833	0,785	0,744	0,708	0,678

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Capítulo 1-Aspectos generales: ART. 107 Control y aceptación de los trabajos. Tabla 107 – 1. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, p. 107-5.

El límite inferior del intervalo de confianza para los resultados de resistencia es el siguiente:

$$V_l(p) = 4,71 - 0,819 * 0,35 = 4,43MPa$$

El límite superior del intervalo de confianza para los resultados de resistencia es el siguiente:

$$V_{l,sup}(p) = 4,71 + 0,819 * 0,35 = 5,00MPa$$

A partir del intervalo de confianza calculado (4,43MPa – 5,00MPa), se rechazan los resultados individuales de resistencia obtenidos del ensayo de módulo de rotura para los especímenes de concreto de la muestra FI-I-T-1 que están fuera del intervalo de confianza y se realiza nuevamente el cálculo del intervalo de confianza para los tres resultados de resistencia restantes, con el fin de verificar que dichos resultados estén dentro del nuevo intervalo de confianza estimado.

Del Cuadro 25 se observa que el valor de resistencia rechazado es el de 5,05MPa, ya que este se encuentra fuera del intervalo de confianza, por lo tanto, el promedio y la desviación estándar de los resultados restantes de resistencia son:

$$V_m = \frac{(4,65 + 4,90 + 4,25)}{3,00} = 4,60MPa$$

$$s = \sqrt{\frac{(4,65 - 4,60)^2 + (4,90 - 4,60)^2 + (4,25 - 4,60)^2}{3,00 - 1,00}} = 0,33MPa$$

Para  $n=3$  resultados de resistencia y un 90% de probabilidad, el valor del factor  $k$  es 1,089.

El límite inferior del intervalo de confianza para tres resultados de resistencia es el siguiente:

$$V_l(p) = 4,60 - 1,089 * 0,33 = 4,24MPa$$

El límite superior del intervalo de confianza para tres resultados de resistencia es el siguiente:

$$V_{l,sup}(p) = 4,60 + 1,089 * 0,33 = 4,96MPa$$

El intervalo de confianza para los tres resultados de resistencia es 4,24MPa – 4,96MPa, por lo tanto, se observa que los resultados individuales de resistencia obtenidos del ensayo de módulo de rotura para los tres especímenes de concreto restantes de la muestra FI-I-T-1 están dentro del intervalo de confianza, por lo cual se aceptan dichos resultados.

**4.1.4 Resultados estadístico para aceptación de resultados.** A continuación se presentan los resultados estadísticos para aceptación de resultados de resistencia y el respectivo análisis estadísticos realizados a cada una de las muestras de concreto con y sin adición de fibra sintética.

**4.1.3.1 Módulo de rotura.** Con base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se procede a realizar el análisis estadístico de los resultados de módulo de rotura de las muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas falladas a los 28 días de edad. Inicialmente se realiza el análisis estadístico para la aceptación y rechazo de los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura y posteriormente se determina el cálculo de resistencia.

En el Cuadro 27 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura realizados a los especímenes prismáticos de concreto para la muestra patrón y se resalta el resultado que se encuentra fuera del intervalo de confianza, el cual es rechazado y no se tiene en cuenta para el cálculo del módulo de rotura de la muestra patrón.

Cuadro 27. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	MR-4 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
PATRÓN	3,95	4,25	3,80	4,00	90	4,00	4,00	0,187	0,819	3,85	4,15

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 28, se muestran los resultados individuales de módulo de rotura aceptados para el cálculo de resistencia para la muestra patrón, se presenta el nuevo intervalo de confianza estimado para los tres resultados individuales de resistencia y el módulo de rotura de la muestra patrón se calcula como el promedio de dichos resultados individuales.

Cuadro 28. Validación de datos resultados muestra patrón

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (Mpa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
PATRÓN	3,95	4,25	4,00	90,00	4,07	3,00	0,161	1,089	3,89	4,24

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 29 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura realizados a los especímenes prismáticos de concreto con adición de la macrofibra Toc Fibra 500 en cinco proporciones diferentes de dosificación y se resalta el resultado que se encuentra por fuera del intervalo de confianza, el cual es rechazado y no se tiene en cuenta para el cálculo del módulo de rotura de cada una de las muestras.

Cuadro 29. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibra Toc Fibra 500

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	MR-4 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-T-1	4,65	5,05	4,90	4,25	90,00	4,71	4,00	0,350	0,819	4,43	5,00
F1-I-T-2	4,95	4,55	5,10	4,15	90,00	4,69	4,00	0,427	0,819	4,34	5,04
F1-I-T-3	5,20	5,40	6,15	4,90	90,00	5,41	4,00	0,533	0,819	4,98	5,85
F1-I-T-4	5,55	5,70	5,20	5,05	90,00	5,38	4,00	0,301	0,819	5,13	5,62
F1-I-T-5	5,55	5,40	4,50	4,40	90,00	4,96	4,00	0,596	0,819	4,47	5,45

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 30, se muestran los resultados individuales de módulo de rotura aceptados para el cálculo de resistencia de cada una de las muestras con adición de la macrofibra Toc Fibra 500, se presenta el nuevo intervalo de confianza estimado para los tres resultados individuales de resistencia y el módulo de rotura de cada una de las muestras se calcula como el promedio de dichos resultados individuales.

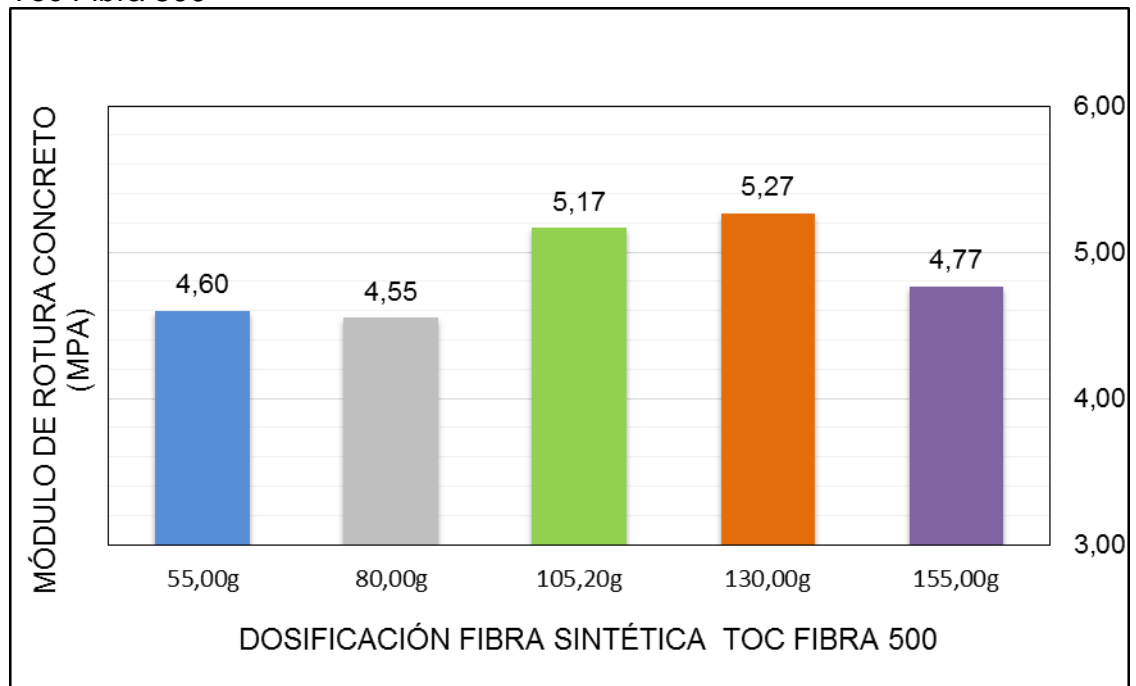
Cuadro 30. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibra Toc Fibra 500

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-T-1	4,65	4,90	4,25	90,00	4,60	3,00	0,328	1,089	4,24	4,96
F1-I-T-2	4,95	4,55	4,15	90,00	4,55	3,00	0,400	1,089	4,11	4,99
F1-I-T-3	5,20	5,40	4,90	90,00	5,17	3,00	0,252	1,089	4,89	5,44
F1-I-T-4	5,55	5,20	5,05	90,00	5,27	3,00	0,257	1,089	4,99	5,55
F1-I-T-5	5,40	4,50	4,40	90,00	4,77	3,00	0,551	1,089	4,17	5,37

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 15, se observa que el módulo de rotura de la mezcla patrón incrementa conforme se aumenta la dosificación de la fibra empleada en la muestra, sin embargo, el módulo de rotura decrece cuando la dosificación supera los 130,00g de fibra, siendo esta dosificación la que presenta mayor aporte en el incremento del módulo de rotura del concreto en comparación con las otras dosificaciones. De acuerdo al diseño de mezcla de la muestra patrón, se requiere 9,5 bultos de cemento Holcim por metro cúbico de concreto, y con base a la ficha técnica de la macrofibra la dosificación recomendada es de 1,00Kg/m<sup>3</sup> de concreto, por lo tanto se requiere 105,20g por bulto de cemento, esta dosificación corresponde a la recomendada por los fabricantes de la macrofibra, con la cual se obtiene el segundo mejor resultado en cuanto al incremento del módulo de rotura de la mezcla.

Figura 15. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 31 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura realizados a los especímenes prismáticos de concreto con adición de la macrofibra Tuf Strand SF en cinco proporciones diferentes de dosificación y se resalta el resultado que se encuentra por fuera del intervalo de confianza, el cual es rechazado y no se tiene en cuenta para el cálculo del módulo de rotura de cada una de las muestras.



Cuadro 31. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	MR-4 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-SF-1	3,75	4,40	3,85	4,60	90,00	4,15	4,00	0,414	0,819	3,81	4,49
F1-I-SF-2	4,70	4,65	4,45	4,70	90,00	4,63	4,00	0,119	0,819	4,53	4,72
F1-I-SF-3	4,90	4,95	4,45	4,75	90,00	4,76	4,00	0,225	0,819	4,58	4,95
F1-I-SF-4	4,00	4,00	4,10	4,50	90,00	4,15	4,00	0,238	0,819	3,96	4,34
F1-I-SF-5	3,80	4,20	4,00	4,35	90,00	4,09	4,00	0,239	0,819	3,89	4,28

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 32, se muestran los resultados individuales de módulo de rotura aceptados para el cálculo de resistencia de cada una de las muestras con adición de la macrofibra Tuf Strand SF, se presenta el nuevo intervalo de confianza estimado para los tres resultados individuales de resistencia y el módulo de rotura de cada una de las muestras se calcula como el promedio de dichos resultados individuales.

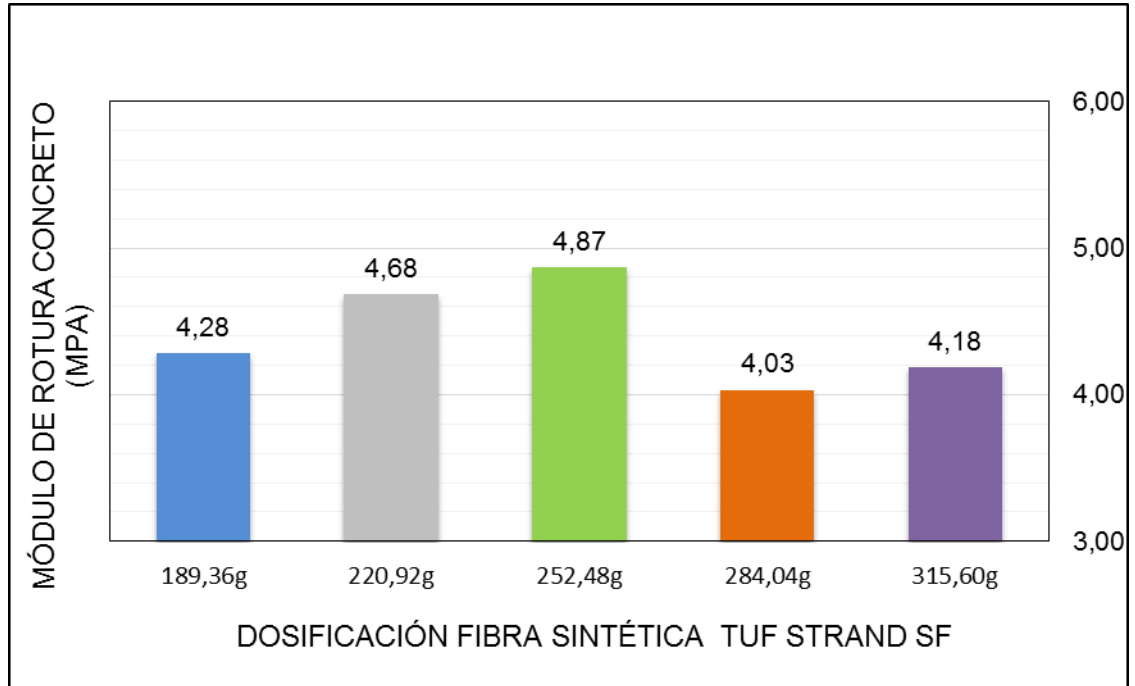
Cuadro 32. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-SF-1	4,40	3,85	4,60	90,00	4,28	3,00	0,388	1,089	3,86	4,71
F1-I-SF-2	4,70	4,65	4,70	90,00	4,68	3,00	0,029	1,089	4,65	4,71
F1-I-SF-3	4,90	4,95	4,75	90,00	4,87	3,00	0,104	1,089	4,75	4,98
F1-I-SF-4	4,00	4,00	4,10	90,00	4,03	3,00	0,058	1,089	3,97	4,10
F1-I-SF-5	4,20	4,00	4,35	90,00	4,18	3,00	0,176	1,089	3,99	4,37

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 16, se observa que el módulo de rotura de la mezcla patrón incrementa conforme se aumenta la dosificación de la fibra empleada en la muestra, sin embargo, el módulo de rotura decrece cuando la dosificación supera los 252,48g de fibra, siendo esta dosificación la que presenta mayor aporte en el incremento del módulo de rotura del concreto en comparación con las otras dosificaciones. La dosificación recomendada por los fabricantes de la fibra varía entre  $(1,80 - 12,00)\text{Kg/m}^3$  de concreto según los requerimientos de la mezcla y aplicaciones de la misma, y para dosificaciones inferiores a  $3,00\text{Kg/m}^3$  de concreto no se espera pérdida de asentamiento de la mezcla en comparación con la muestra patrón, por lo tanto, se escogió como dosificación recomendada de la macrofibra los  $1,80\text{Kg/m}^3$  de concreto, la cual equivale a 189,36g por bulto de cemento, con lo cual, se obtiene el tercer mejor resultado en cuanto al incremento del módulo de rotura de la mezcla, no obstante, para la mezcla de concreto mayores dosificaciones de fibra que la recomendada proporciona mayores incrementos en el módulo de rotura de la mezcla.

Figura 16. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 33 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura realizados a los especímenes prismáticos de concreto con adición de la microfibra Fiber Strand N en cinco proporciones diferentes de dosificación y se resalta el resultado que se encuentra por fuera del intervalo de confianza, el cual es rechazado y no se tiene en cuenta para el cálculo del módulo de rotura de cada una de las muestras.

Cuadro 33. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	MR-4 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-N-1	4,05	4,30	4,35	4,10	90,00	4,20	4,00	0,147	0,819	4,08	4,32
F1-I-N-2	4,65	4,50	4,40	4,60	90,00	4,54	4,00	0,111	0,819	4,45	4,63
F1-I-N-3	4,10	3,75	3,95	4,45	90,00	4,06	4,00	0,295	0,819	3,82	4,30
F1-I-N-4	4,35	4,55	4,50	4,40	90,00	4,45	4,00	0,091	0,819	4,38	4,52
F1-I-N-5	4,40	4,35	4,35	3,95	90,00	4,26	4,00	0,210	0,819	4,09	4,43

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 34, se muestran los resultados individuales de módulo de rotura aceptados para el cálculo de resistencia de cada una de las muestras con adición de la microfibra Fiber Strand N, se presenta el nuevo intervalo de confianza estimado para los tres resultados individuales de resistencia y el módulo de rotura

de cada una de las muestras se calcula como el promedio de dichos resultados individuales.

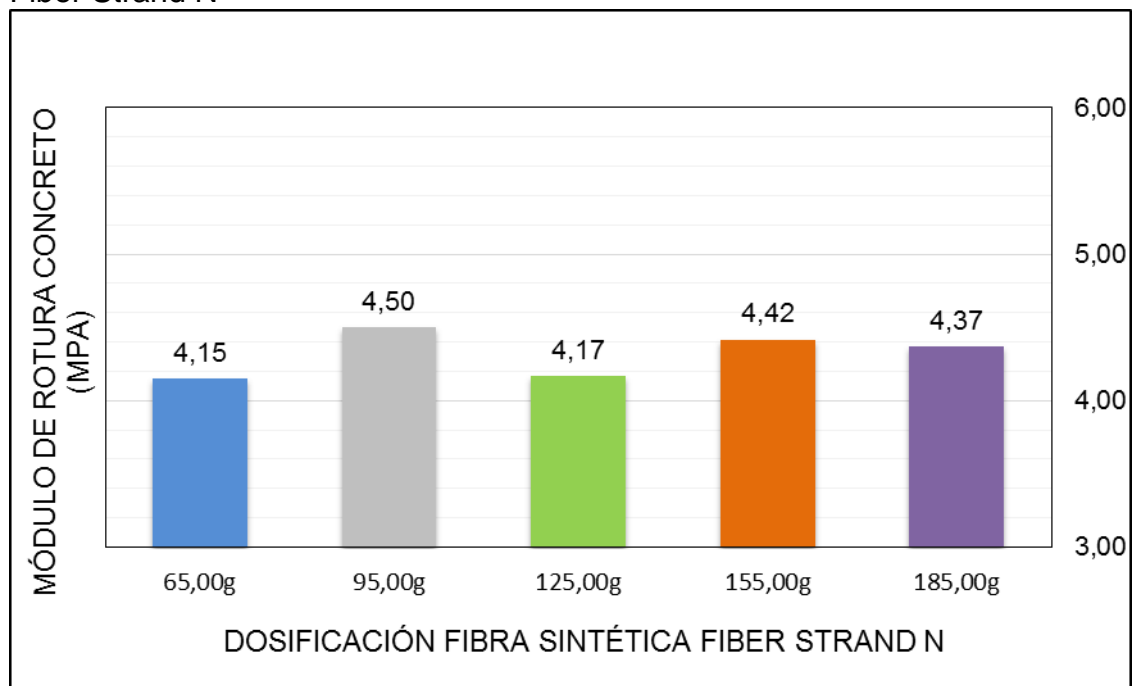
Cuadro 34. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	V <sub>i</sub> (p=90%)	V <sub>i, sup</sub> (p=90%)
F1-I-N-1	4,05	4,30	4,10	90,00	4,15	3,00	0,132	1,089	4,01	4,29
F1-I-N-2	4,50	4,40	4,60	90,00	4,50	3,00	0,100	1,089	4,39	4,61
F1-I-N-3	4,10	3,95	4,45	90,00	4,17	3,00	0,257	1,089	3,89	4,45
F1-I-N-4	4,35	4,50	4,40	90,00	4,42	3,00	0,076	1,089	4,33	4,50
F1-I-N-5	4,40	4,35	4,35	90,00	4,37	3,00	0,029	1,089	4,34	4,40

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 17, se observa que el mayor valor en el módulo de rotura corresponde a la muestra de concreto con una dosificación de 95,00g de fibra y el menor valor en el módulo de rotura corresponde a la muestra de concreto con una dosificación de 65,00g de fibra. Esta última dosificación equivale a la recomendada por los fabricantes de la fibra (0,60Kg/m<sup>3</sup> de concreto), para estas dosificaciones se espera una pérdida de asentamiento de la mezcla en comparación con la muestra patrón.

Figura 17. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 35 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura realizados a los especímenes prismáticos de concreto con adición de la microfibra Sika Fiber AD en cinco proporciones diferentes de dosificación y se resalta el resultado que se encuentra por fuera del intervalo de confianza, el cual es rechazado y no se tiene en cuenta para el cálculo del módulo de rotura de cada una de las muestras. La muestra F1-I-AD-2 presenta tres resultados individuales de módulo de rotura, ya que al realizar el ensayo al otro espécimen prismático de concreto, la máquina de ensayo no registró los resultados al momento de la falla y se perdió dicha información.

Cuadro 35. Resultados ensayo módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	MR-4 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-AD-1	4,35	4,80	4,60	4,00	90,00	4,44	4,00	0,345	0,819	4,16	4,72
F1-I-AD-2	4,55	4,30		5,70	90,00	4,85	3,00	0,747	1,089	4,04	5,66
F1-I-AD-3	4,35	4,05	4,20	4,60	90,00	4,30	4,00	0,235	0,819	4,11	4,49
F1-I-AD-4	4,05	5,75	4,95	4,90	90,00	4,91	4,00	0,694	0,819	4,34	5,48
F1-I-AD-5	5,25	5,15	4,80	4,80	90,00	5,00	4,00	0,235	0,819	4,81	5,19

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 36, se muestran los resultados individuales de módulo de rotura aceptados para el cálculo de resistencia de cada una de las muestras con adición de la microfibra Sika Fiber AD, se presenta el nuevo intervalo de confianza estimado para los tres resultados individuales de resistencia y el módulo de rotura de cada una de las muestras se calcula como el promedio de dichos resultados individuales.

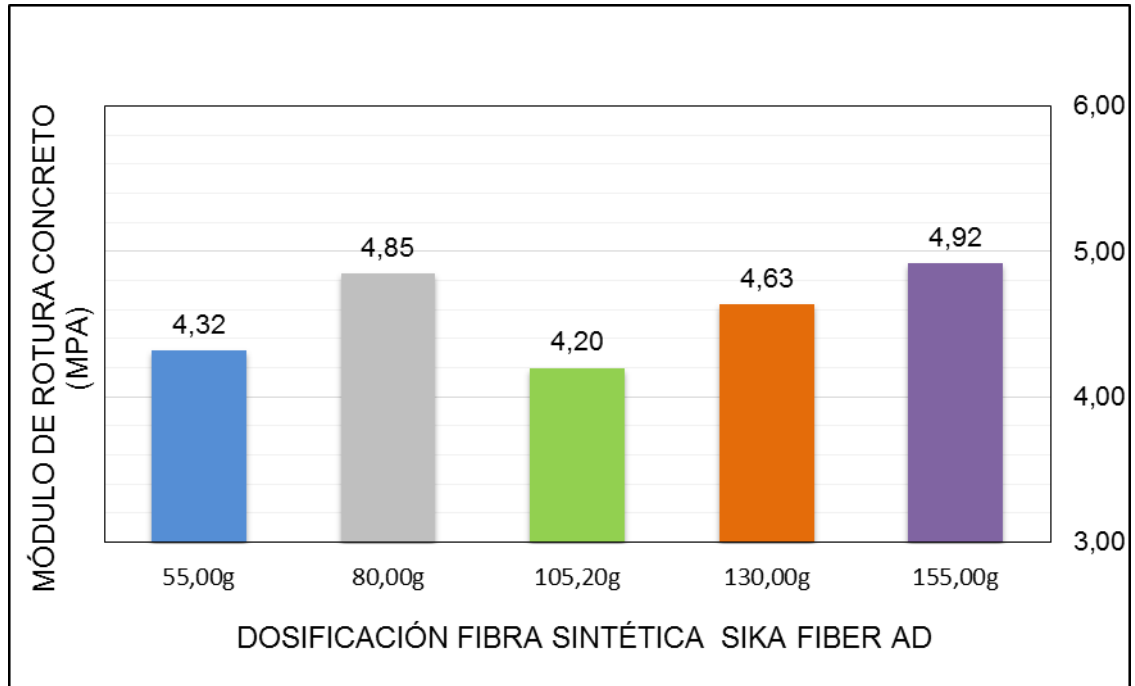
Cuadro 36. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-AD-1	4,35	4,60	4,00	90,00	4,32	3,00	0,301	1,089	3,99	4,64
F1-I-AD-2	4,55	4,30	5,70	90,00	4,85	3,00	0,747	1,089	4,04	5,66
F1-I-AD-3	4,35	4,05	4,20	90,00	4,20	3,00	0,150	1,089	4,04	4,36
F1-I-AD-4	4,05	4,95	4,90	90,00	4,63	3,00	0,506	1,089	4,08	5,18
F1-I-AD-5	5,15	4,80	4,80	90,00	4,92	3,00	0,202	1,089	4,70	5,14

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 18, se observa que el mayor valor en el módulo de rotura corresponde a la muestra de concreto con una dosificación de 155,00g de microfibra y el menor valor en el módulo de rotura corresponde a la muestra de concreto con una dosificación de 105,20g de microfibra. Esta última dosificación equivale a la recomendada por los fabricantes de la fibra (1,00Kg/m<sup>3</sup> de concreto), el uso de esta fibra no reduce el asentamiento de la mezcla en comparación con la muestra patrón.

Figura 18. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 37 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura realizados a los especímenes prismáticos de concreto con adición de la macrofibra Sika Fiber Force PP/PE-700/55 en cinco proporciones diferentes de dosificación y se resalta el resultado que se encuentra por fuera del intervalo de confianza, el cual es rechazado y no se tiene en cuenta para el cálculo del módulo de rotura de cada una de las muestras.

Cuadro 37. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	MR-4 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-F-1	4,25	4,50	4,00	4,45	90,00	4,30	4,00	0,227	0,819	4,11	4,49
F1-I-F-2	4,40	4,25	4,25	4,40	90,00	4,33	4,00	0,087	0,819	4,25	4,40
F1-I-F-3	4,05	5,00	3,80	4,25	90,00	4,28	4,00	0,517	0,819	3,85	4,70
F1-I-F-4	3,75	4,10	4,65	3,75	90,00	4,06	4,00	0,425	0,819	3,71	4,41
F1-I-F-5	4,60	3,85	4,00	4,70	90,00	4,29	4,00	0,425	0,819	3,94	4,64

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 38, se muestran los resultados individuales de módulo de rotura aceptados para el cálculo de resistencia de cada una de las muestras con adición de la macrofibra Sika Fiber Force PP/PE-700/55, se presenta el nuevo intervalo de confianza estimado para los tres resultados individuales de resistencia y el

módulo de rotura de cada una de las muestras se calcula como el promedio de dichos resultados individuales.

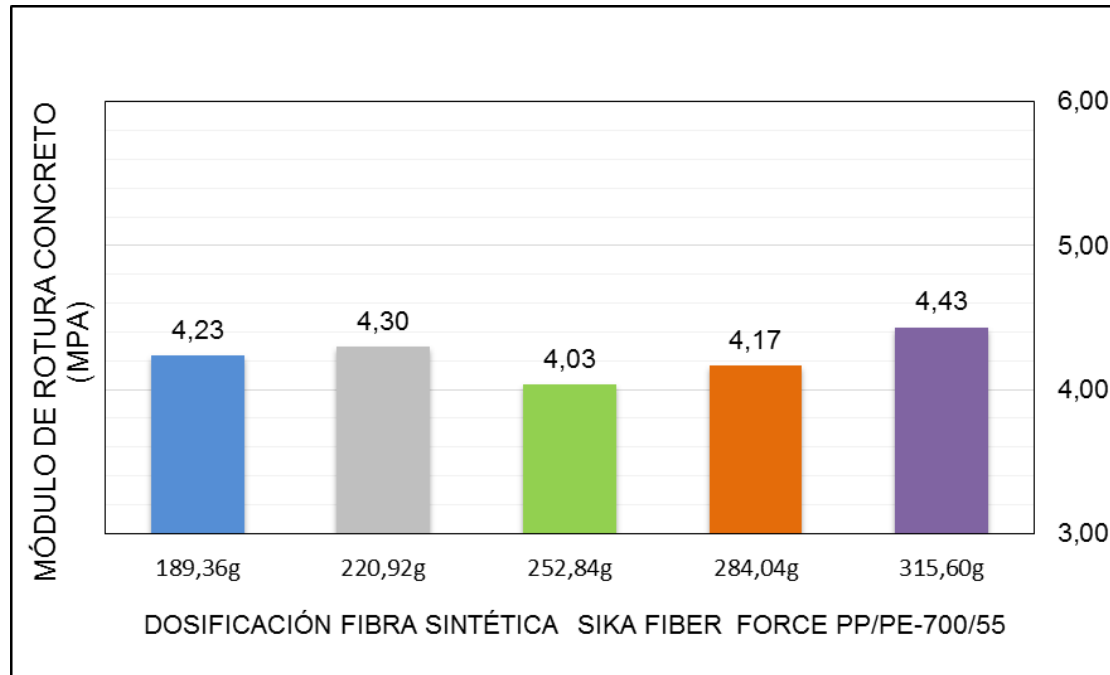
Cuadro 38. Validación de datos resultados muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

MUESTRA	MR-1 (MPa)	MR-2 (MPa)	MR-3 (MPa)	Probabilidad (%)	Prom (MPa)	Número de datos	Desviación estándar (MPa)	k	Vi (p=90%)	Vi, sup (p=90%)
F1-I-F-1	4,25	4,00	4,45	90,00	4,23	3,00	0,225	1,089	3,99	4,48
F1-I-F-2	4,25	4,25	4,40	90,00	4,30	3,00	0,087	1,089	4,21	4,39
F1-I-F-3	4,05	3,80	4,25	90,00	4,03	3,00	0,225	1,089	3,79	4,28
F1-I-F-4	4,10	4,65	3,75	90,00	4,17	3,00	0,454	1,089	3,67	4,66
F1-I-F-5	4,60	4,00	4,70	90,00	4,43	3,00	0,379	1,089	4,02	4,85

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 19, se observa que el mayor incremento en el módulo de rotura de la mezcla patrón se obtiene con una dosificación de 315,60g de macrofibra. La dosificación recomendada por los fabricantes de la fibra varía entre 2,00–9,00Kg/m<sup>3</sup> de concreto según los requerimientos de la mezcla y aplicaciones de la misma, el uso de esta fibra no reduce el asentamiento de la mezcla en comparación con la muestra patrón. Se escogió como dosificación de trabajo de la macrofibra 1,80Kg/m<sup>3</sup> de concreto, la cual equivale a 189,36g por bulto de cemento, con la cual, se obtiene el tercer mejor resultado en cuanto al incremento del módulo de rotura de la mezcla.

Figura 19. Variación módulo de rotura muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55



Fuente: Elaboración propia, 2018.

**4.1.3.2 Resistencia a la compresión.** La resistencia a la compresión de cada una de las muestras de concreto con y sin adición de fibra sintética se evalúa a los 28 días de edad, y se obtiene como el promedio de dos especímenes compañeros de concreto por cada muestra ensayada, cumpliendo con lo estipulado en la NSR-10 en el numeral C.5.6.2.4 y numeral 6.2 de la norma INV E-424-13 del INVIAS.

El módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto se calculan dentro de la zona elástica del concreto, la cual puede extenderse alrededor del 45% de la resistencia a la compresión del concreto, por lo tanto, para un 40% del valor de las resistencias promedio a compresión obtenida en cada una de las dosificaciones utilizadas en las diferentes muestras de concreto, se obtienen los valores de módulo de elasticidad y relación de Poisson como se define en el norma INV E-424-13.

En el Cuadro 39 se presenta el resultado promedio de resistencia a la compresión a los 28 días de edad de la muestra patrón.

Cuadro 39. Resistencia promedio a la compresión de la muestra patrón

Mezcla	Muestra	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (KN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo promedio, f'c (MPa)
M1-1	1	28	152,75	18325,35	485,60	26,50	25,25
M1-2	2	28	151,75	18086,20	433,90	24,00	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 40 se presentan los resultados promedio de resistencia a la compresión a los 28 días de edad, de cada una de las muestras de concreto con adición de las diferentes fibras sintéticas en cinco proporciones diferentes de dosificación.

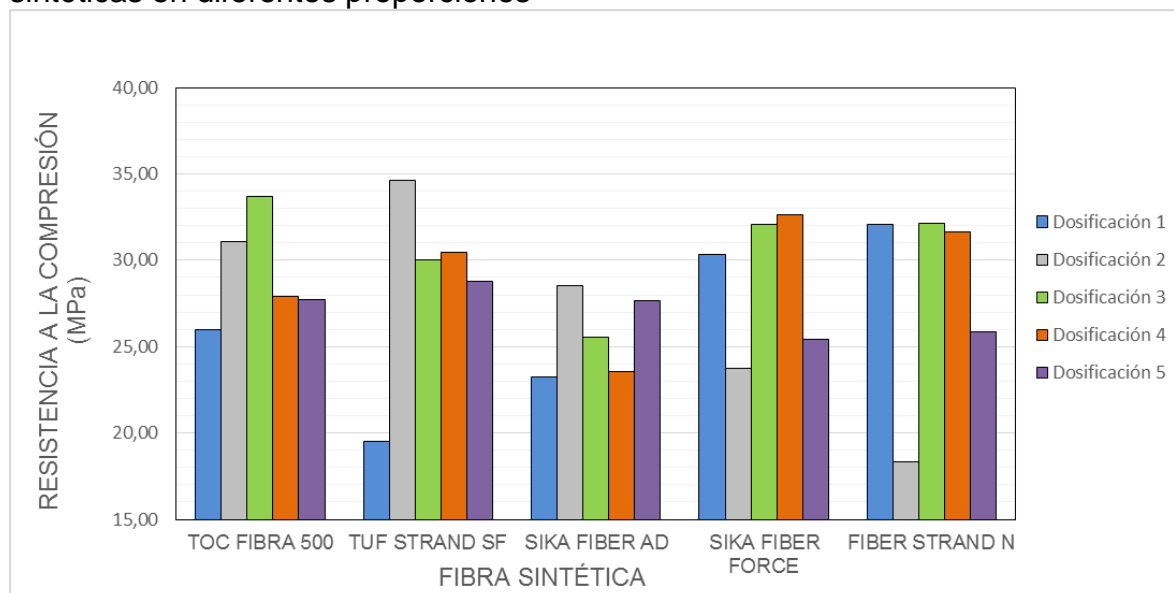
Cuadro 40. Resistencias promedios a la compresión de muestras con adición de fibras sintéticas

DOSIFICACIÓN DE LA FIBRA	Esfuerzo promedio, f'c (MPa)				
	TOC FIBRA 500	TUF STRAND SF	FIBER STRAND N	SIKA FIBER AD	SIKA FIBER FORCE
Dosificación 1	26,00	31,10	27,75	33,70	27,90
Dosificación 2	19,50	34,60	28,80	30,05	30,45
Dosificación 3	23,25	28,55	27,65	25,55	23,55
Dosificación 4	30,35	23,75	25,40	32,05	32,65
Dosificación 5	32,05	18,35	25,85	32,15	31,65

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 20, se observan los valores de resistencia última a la compresión a los 28 días de edad de cada una de las muestras de concreto con adición de fibras sintéticas en cinco proporciones diferentes de dosificación. Se observa que se presentan variaciones en las resistencias de cada una de las muestras, las cuales están asociadas a la fabricación de las muestras, curado y transporte de muestras, porcentaje de dosificación de las fibras, variaciones en la calidad de los agregados, temperatura ambiente al momento de la fabricación, entre otros factores que pudieron incidir en los resultados obtenidos, sin embargo, para el 40% de resistencia promedio a la compresión obtenido en cada dosificación de fibra para las muestra de concreto ensayadas, se realizan los respectivos ensayos de módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Figura 20. Variación resistencias a la compresión muestras con adición de fibras sintéticas en diferentes proporciones



Fuente: Elaboración propia, 2018.

**4.1.3.2 Módulo de elasticidad.** Con base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se procede a realizar el análisis estadístico de los resultados de módulo de elasticidad de las muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas a los 28 días de edad.

Los valores de módulo de elasticidad y relación de Poisson para cada uno de los especímenes ensayados se obtienen con base a lo especificado en la norma INV E-424-13, y para cada muestra de concreto ensayada se tienen resultados de dos especímenes cilíndricos, por lo tanto, el promedio aritmético de los dos especímenes cilíndricos compañeros se reporta como el valor del módulo de elasticidad y relación de Poisson.



En el Cuadro 41 se presentan los resultados individuales obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson realizados a los especímenes cilíndricos de concreto para la muestra patrón y se presenta el promedio de dichos resultados individuales.

Cuadro 41. Módulo de elasticidad y relación de Poisson de la muestra patrón

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
M1-3	3	0,25	0,29	37481,59	34800,00
M1-4	4	0,32		32247,89	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 42 se presentan los resultados individuales obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson realizados a cada una de las muestras de concreto con adición de la macrofibra Toc Fibra 500 en cinco proporciones diferentes de dosificación y se presenta el promedio de dichos resultados individuales para cada dosificación utilizada.

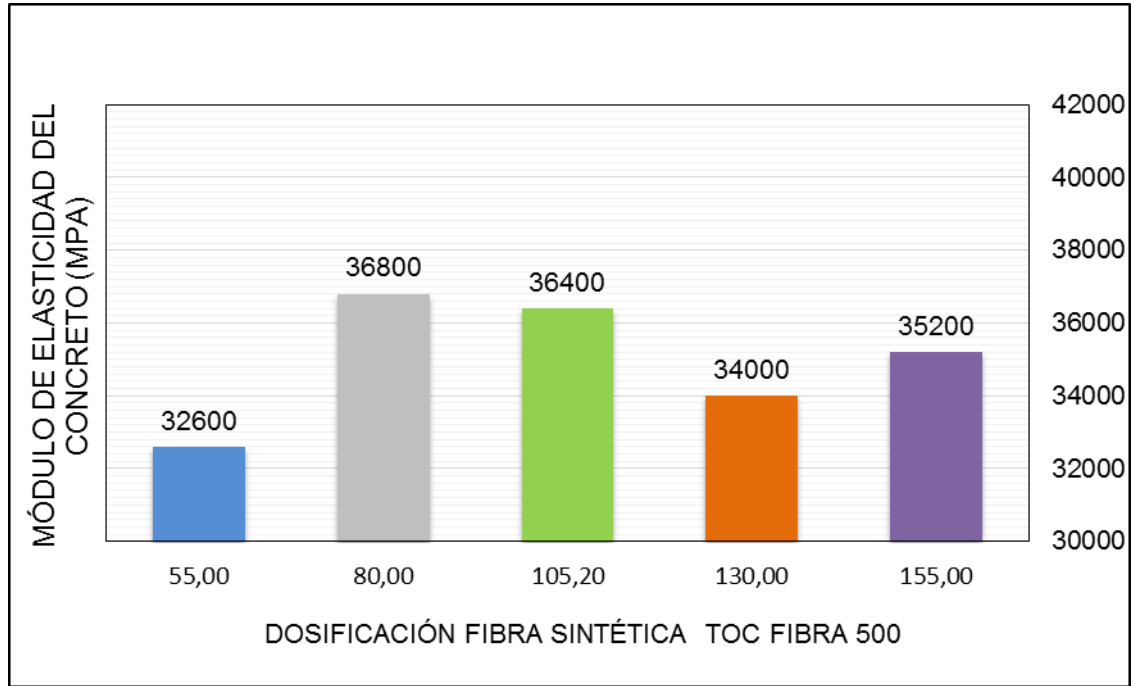
Cuadro 42. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
F1-I-T-1	3	0,24	0,24	31001,51	32600,00
F1-I-T-1	4	0,24		34301,66	
F1-I-T-2	3	0,21	0,28	35717,95	36800,00
F1-I-T-2	4	0,35		37869,77	
F1-I-T-3	3	0,24	0,21	33954,53	36400,00
F1-I-T-3	4	0,17		38932,89	
F1-I-T-4	3	0,26	0,29	31754,07	34000,00
F1-I-T-4	4	0,32		36269,69	
F1-I-T-5	3	0,34	0,36	38414,72	35200,00
F1-I-T-5	4	0,39		32100,58	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 21, se observa el comportamiento del módulo de elasticidad de la mezcla patrón con adición de macrofibras Toc Fibra en cinco proporciones diferentes de dosificación, el rango de variación del módulo de elasticidad está entre los 32600MPa y 36800MPa. La dosificación de la fibra recomendada por los fabricantes es de 105,20g por bulto de cemento ( $1,00\text{Kg/m}^3$ ) con lo cual se obtiene el segundo valor mayor en el módulo de elasticidad del concreto. Dosificaciones inferiores a los 55,00g producen los menores incrementos en los módulos de elasticidad.

Figura 21. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 43 se presentan los resultados individuales obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson realizados a cada una de las muestras de concreto con adición de la macrofibra Tuf Strand SF en cinco proporciones diferentes de dosificación y se presenta el promedio de dichos resultados individuales para cada dosificación utilizada.

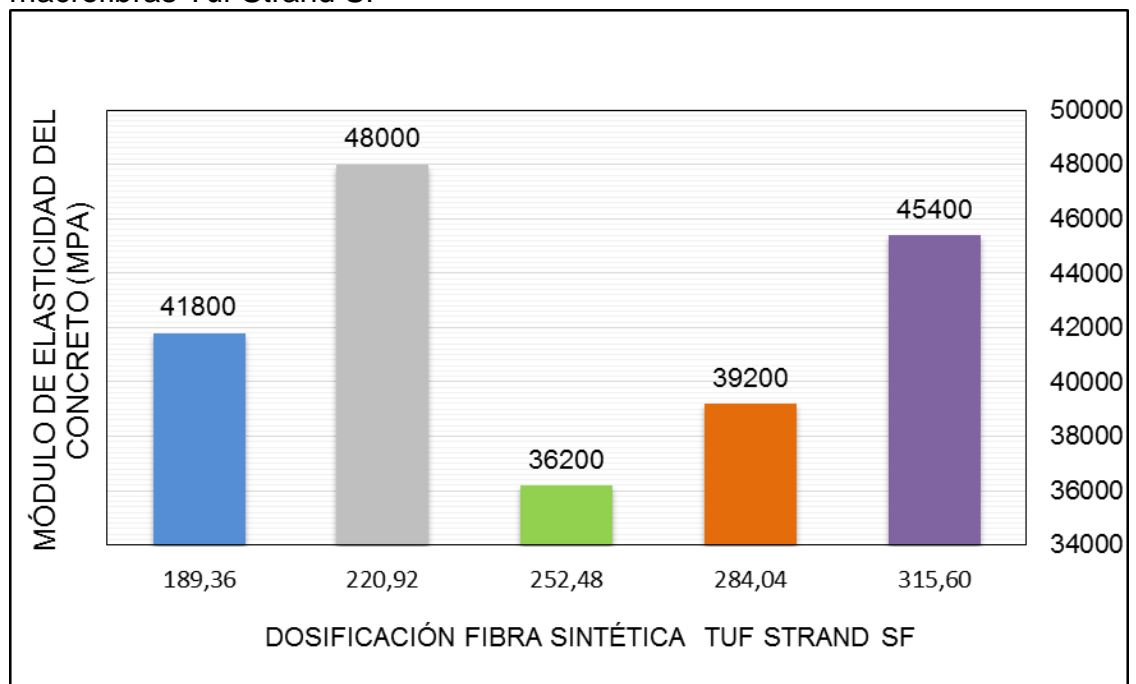
Cuadro 43. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
F1-I-SF-1	3	0,16	0,24	41316,12	41800,00
F1-I-SF-1	4	0,32		42111,20	
F1-I-SF-2	3	0,65	0,42	56241,49	48000,00
F1-I-SF-2	4	0,18		39602,96	
F1-I-SF-3	3	0,26	0,24	40305,96	36200,00
F1-I-SF-3	4	0,22		32147,42	
F1-I-SF-4	3	0,17	0,24	40543,68	39200,00
F1-I-SF-4	4	0,31		37829,73	
F1-I-SF-5	3	0,35	0,26	46071,24	45400,00
F1-I-SF-5	4	0,17		44916,26	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 22, se observa el comportamiento del módulo de elasticidad de la mezcla patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF en cinco proporciones diferentes de dosificación, el rango de variación del módulo de elasticidad está entre los 36200MPa y 48000MPa. La dosificación de la fibra recomendada por los fabricantes es de 189,36g por bulto de cemento (1,80Kg/m<sup>3</sup>) con lo cual se obtiene el tercer valor mayor en el módulo de elasticidad del concreto.

Figura 22. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 44 se presentan los resultados individuales obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson realizados a cada una de las muestras de concreto con adición de la microfibras Fiber Strand N en cinco proporciones diferentes de dosificación y se presenta el promedio de dichos resultados individuales para cada dosificación utilizada.

Cuadro 44. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
F1-I-N-1	3	0,40	0,34	37541,75	37400,00
F1-I-N-1	4	0,28		37062,18	
F1-I-N-2	3	0,30	0,29	33414,75	33000,00
F1-I-N-2	4	0,29		32544,75	

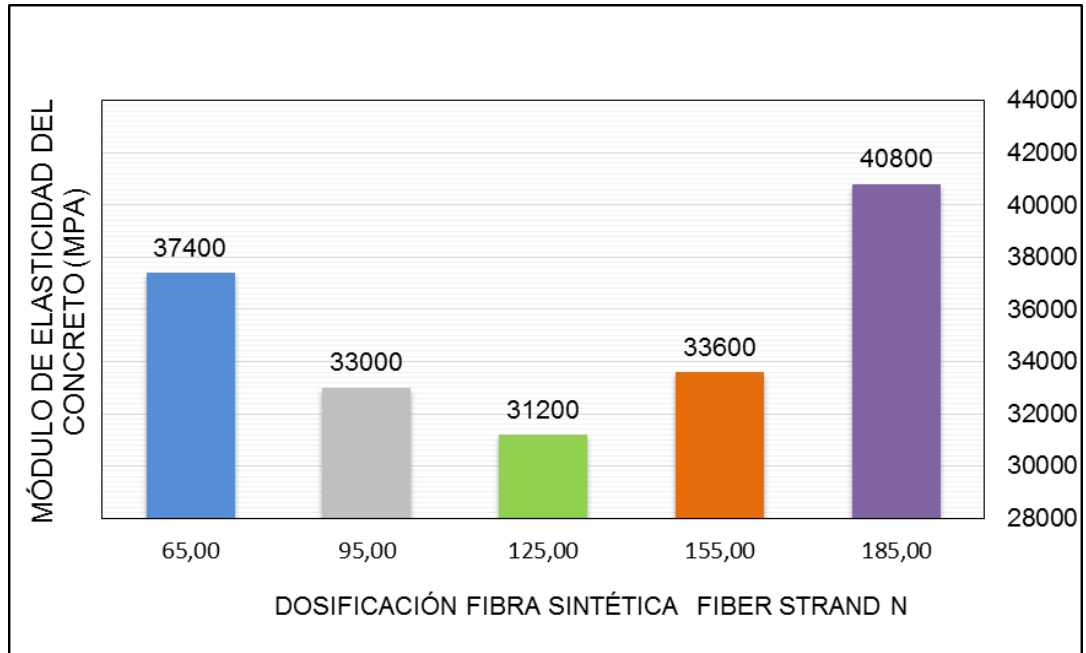
Cuadro 44. (Continuación)

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
F1-I-N-3	3	0,17	0,17	31133,23	31200,00
F1-I-N-3	4	-			
F1-I-N-4	3	0,34	0,28	35570,95	33600,00
F1-I-N-4	4	0,22			
F1-I-N-5	3	0,17	0,22	35342,08	40800,00
F1-I-N-5	4	0,27			

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 23, se observa el comportamiento del módulo de elasticidad de la mezcla patrón con adición de microfibras Fiber Strand N en cinco proporciones diferentes de dosificación, el rango de variación del módulo de elasticidad está entre los 31200MPa y 40800MPa. La dosificación de la fibra recomendada por los fabricantes es de 65,00g por bulto de cemento ( $0,60\text{Kg/m}^3$ ) con lo cual se obtiene el segundo valor mayor en el módulo de elasticidad del concreto.

Figura 23. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 45 se presentan los resultados individuales obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson realizados a cada una de las muestras de concreto con adición de la microfibra Sika Fiber AD en cinco proporciones diferentes de dosificación y se presenta el promedio de dichos resultados individuales para cada dosificación utilizada.

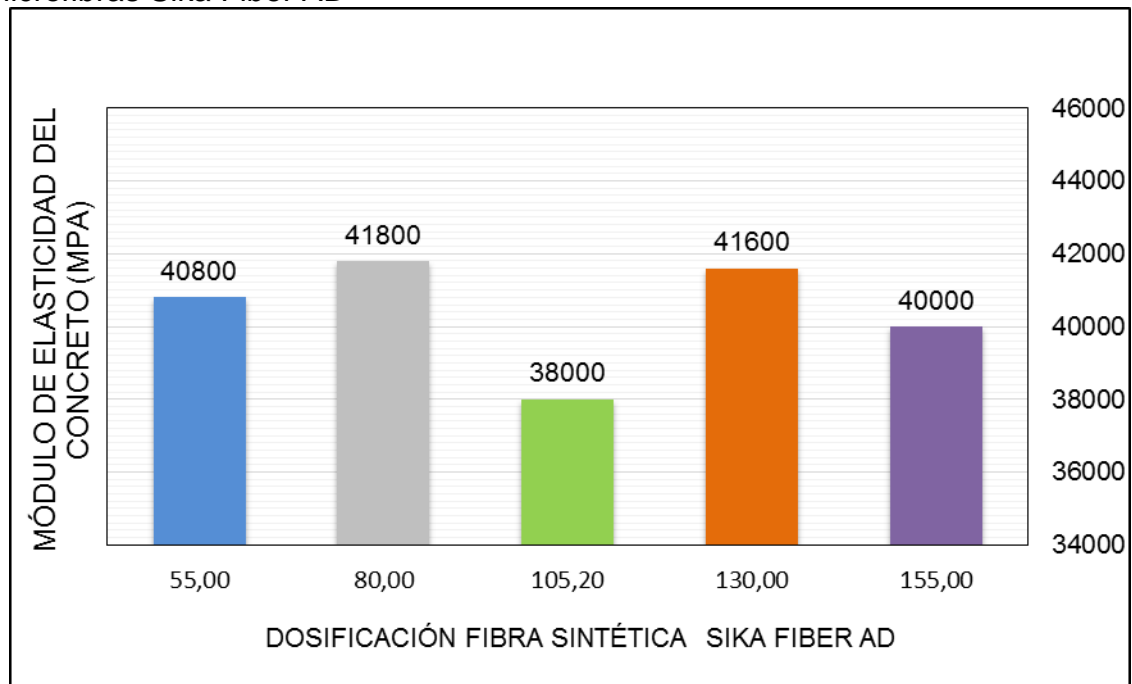
Cuadro 45. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
F1-I-AD-1	3	0,21	0,22	38886,25	40800,00
F1-I-AD-1	4	0,24		42723,29	
F1-I-AD-2	3	0,43	0,31	45161,37	41800,00
F1-I-AD-2	4	0,20		38454,69	
F1-I-AD-3	3	0,22	0,27	35724,42	38000,00
F1-I-AD-3	4	0,32		40302,72	
F1-I-AD-4	3	0,25	0,33	39209,07	41600,00
F1-I-AD-4	4	0,42		43933,53	
F1-I-AD-5	3	0,32	0,25	38207,10	40000,00
F1-I-AD-5	4	0,18		41599,20	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 24, se observa el comportamiento del módulo de elasticidad de la mezcla patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD en cinco proporciones diferentes de dosificación, el rango de variación del módulo de elasticidad está entre los 38000MPa y 41800MPa. La dosificación de la fibra recomendada por los fabricantes es de 105,20g por bulto de cemento ( $1,00\text{Kg/m}^3$ ) con lo cual se obtiene el menor incremento en el módulo de elasticidad del concreto.

Figura 24. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 46 se presentan los resultados individuales obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad y relación de Poisson realizados a cada una de las muestras de concreto con adición de la macrofibra Sika Fiber Force PP/PE-700/55 en cinco proporciones diferentes de dosificación y se presenta el promedio de dichos resultados individuales para cada dosificación utilizada.

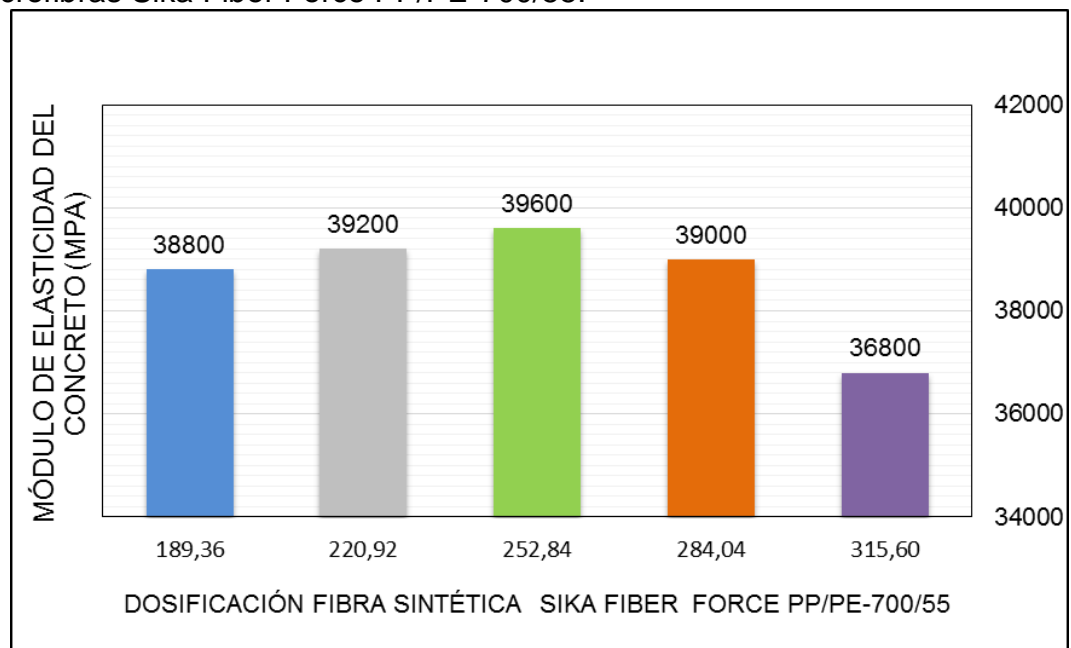
Cuadro 46. Módulo de elasticidad y relación de Poisson muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

Mezcla	Muestra	Relación poisson ( $\mu$ )	Relación poisson promedio ( $\mu$ )	Módulo de Elasticidad (MPa)	Módulo de Elasticidad promedio (MPa)
F1-I-F-1	3	0,23	0,23	39573,04	38800,00
F1-I-F-1	4	0,23		38027,67	
F1-I-F-2	3	0,17	0,22	38363,57	39200,00
F1-I-F-2	4	0,27		40009,23	
F1-I-F-3	3	0,41	0,30	42829,61	39600,00
F1-I-F-3	4	0,19		36422,01	
F1-I-F-4	3	0,27	0,27	40896,87	39000,00
F1-I-F-4	4	0,26		37009,67	
F1-I-F-5	3	0,37	0,35	38177,01	36800,00
F1-I-F-5	4	0,33		35239,25	

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 25, se observa el comportamiento del módulo de elasticidad de la mezcla patrón con adición de microfibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55.

Figura 25. Variación módulo de elasticidad muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55.



Fuente: Elaboración propia, 2018.

El rango de variación del módulo de elasticidad de la muestra patrón con adición de la microfibra en cinco proporciones diferentes de dosificación está entre los 36800MPa y 39600MPa. La dosificación de la fibra recomendada por los fabricantes es de 189,36g por bulto de cemento ( $1,80\text{Kg/m}^3$ ) con lo cual se obtiene el segundo menor valor de incremento en el módulo de elasticidad del concreto.

#### **4.2 COMPARACIÓN ESTADÍSTICA MÓDULO DE ROTURA MUESTRA PATRÓN VERSUS MÓDULOS DE ROTURAS MUESTRAS CON ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS**

La comparación estadística entre los valores obtenidos de módulo de rotura de la muestra patrón versus los valores obtenidos de las diferentes muestras modificadas con adición de fibras sintéticas en diferentes dosificaciones, se realiza con base a la prueba t, con el fin de establecer si los promedios de la muestra patrón y las muestras con adición de fibras sintéticas son equivalentes a un mismo nivel de significancia. La prueba t permite establecer el cumplimiento de alguna de las dos hipótesis definidas:

- La inclusión de fibras sintéticas en las mezclas de concreto aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.
- La inclusión de fibras sintéticas en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

A continuación se presenta una muestra de cálculo del análisis estadístico de la prueba t, siguiendo la metodología descrita en la norma INV E-822-13 "Comparación estadística de dos juegos de datos" del INVIAS. Para la muestra de cálculo se utilizan los resultados obtenidos del ensayo de módulo de rotura de la muestra patrón versus la muestra de concreto referenciada como FI-I-T-1, la cual se trata de una muestra de concreto con adición de 55,00gr de Toc Fibra 500 (macro fibra de polipropileno fibrilada).

Del Cuadro 28 se tiene que los valores de módulo de rotura obtenidos para la muestra patrón son 3,95MPa, 4,25MPa y 4,00MPa y del cuadro 30 se tiene que los valores de módulo de rotura obtenidos para la muestra F1-I-T-1 son 4,65MPa, 4,90Mpa y 4,25MPa. Para el desarrollo de la muestra de cálculo se denota la muestra patrón como muestra A y la muestra con adición de fibras sintéticas como muestra B.

Donde:

**Prueba F:** Estadística para determinar si las varianzas de la muestra patrón y las muestras patrón con adición de fibras sintéticas son equivalentes a un nivel dado de significación

**Prueba t:** Estadística para determinar si los promedios de la muestra patrón y las muestras patrón con adición de fibras sintéticas son equivalentes a un nivel dado de significación

**Nivel de significación,  $\alpha$ :** Probabilidad máxima con la que en el ensayo de una hipótesis, ésta se rechaza cuando debía ser aceptada. Se toma  $\alpha = 1,00\%$

$X_i$ : Valores individuales de módulo de rotura

$\bar{X}_a$ : Media de la muestra patrón

$\bar{X}_b$ : Media de la muestra patrón con adición de fibras sintéticas

$n_a$ : Número de resultados de ensayos sobre la muestra patrón

$n_b$ : Número de resultados de ensayos sobre la muestra patrón con adición de fibras sintéticas

$u_a$ : Grados de libertad de la muestra patrón

$u_b$ : Grados de libertad de la muestra patrón con adición de fibras sintéticas

$S_a^2$ : Varianza de la muestra patrón

$S_b^2$ : Varianza de la muestra patrón con adición de fibras sintéticas

$S_p^2$ : Estimativo combinado de la varianza

$u_p$ : Grados de libertad combinados

Para la muestra A y B se tiene:

- Sumatoria de los valores:  $X_{ai}$  y  $X_{bi}$

$$\sum (X_{ai}) = (3,95 + 4,25 + 4,00)MPa = 12,20MPa$$

$$\sum (X_{bi}) = (4,65 + 4,90 + 4,25)MPa = 13,80MPa$$

- Cálculo del valor medio:  $\bar{X}_a$  y  $\bar{X}_b$

$$\bar{X}_a = \frac{12,20MPa}{3} = 4,07MPa$$



$$\bar{Xb} = \frac{13,80MPa}{3} = 4,60MPa$$

- Cálculo de la varianza :  $Sa^2$  y  $Sb^2$

$$Sa^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Xai - \bar{Xa})^2}{n_a - 1} = \frac{(3,95 - 4,06)^2 + (4,25 - 4,06)^2 + (4,00 - 4,06)^2}{3 - 1} = 0,0258$$

$$Sb^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Xbi - \bar{Xb})^2}{n_b - 1} = \frac{(4,65 - 4,60)^2 + (4,90 - 4,60)^2 + (4,25 - 4,60)^2}{3 - 1} = 0,1075$$

- Cálculo del valor de distribución F, (Se coloca la mayor varianza en el numerador)

$$F = \frac{Sb^2}{Sa^2} = \frac{0,1075}{0,0258} = 4,16$$

- Cálculo de los grados de libertad:  $u_a$  y  $u_b$

$$u_a = n_a - 1 = 3 - 1 = 2$$

$$u_b = n_b - 1 = 3 - 1 = 2$$

- Cálculo del valor de distribución F

Del Cuadro 47, se obtiene el valor crítico de F ( $F_{crit}$ ) a partir de los grados de libertad de cada una de las muestras de comparación, por lo tanto, el valor de  $F_{crit} = 199,01$ .

Cuadro 47. Valores de distribución F para  $\alpha = 1,00\%$  (Cuadro parcial, Parte 1)

DISTRIBUCIÓN F												
Nivel de Significación	1,00%											
Numerador Grados de libertad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Denominador Grados de libertad	Values of F											
1	16212,4634	19997,3583	21614,1343	22500,7534	23055,8217	23439,5266	23715,1980	23923,8143	24091,4524	24221,8375	24333,5962	24426,7285
2	198,5027	199,0120	199,1575	199,2448	199,3030	199,3321	199,3612	199,3758	199,3903	199,3903	199,4194	199,4194
3	55,5519	49,8003	47,4683	46,1951	45,3911	44,8381	44,4343	44,1250	43,8813	43,6848	43,5248	43,3865
4	31,3321	26,2844	24,2599	23,1539	22,4563	21,9752	21,6223	21,3522	21,1385	20,9666	20,8238	20,7046
5	22,7847	18,3136	16,5301	15,5560	14,9394	14,5133	14,2004	13,9607	13,7716	13,6179	13,4914	13,3846
6	18,6346	14,5442	12,9166	12,0276	11,4637	11,0731	10,7857	10,5656	10,3914	10,2500	10,1327	10,0345
7	16,2354	12,4037	10,8826	10,0504	9,5229	9,1554	8,8853	8,6779	8,5138	8,3803	8,2696	8,1764
8	14,6883	11,0426	9,5965	8,8053	8,3019	7,9519	7,6941	7,4958	7,3387	7,2107	7,1045	7,0149

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Secciones 700 y 800-Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos: I.N.V.E-822 Comparación estadística de dos juegos de datos. Tabla 822 – 9. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, p. E 822-21.

**Prueba F:** Una vez determinados los valores de  $F$  y  $F_{crit}$  se tienen las siguientes dos situaciones:

- Si  $F \geq F_{crit}$ , las variabilidades de la muestra patrón y la muestra con adición de fibra sintética son significativamente diferentes
- Si  $F < F_{crit}$ , las variabilidades de la muestra patrón y la muestra con adición de fibra sintética no son significativamente diferentes

Como los valores de  $F$  y  $F_{crit}$  son 4,16 y 199,01 respectivamente, se tiene que  $F < F_{crit}$ , por lo tanto, las variabilidades de los módulos de rotura obtenidos para las dos muestras de concreto con y sin adición de fibra sintética no son significativamente diferentes.

Si las variabilidades no son significativamente diferentes la prueba  $t$  se realiza sobre las dos muestras de concreto utilizando una estimación combinada de la varianza y de los grados de libertad, en caso contrario, la prueba  $t$  se realiza utilizando varianzas y tamaño de muestras individuales y grados de libertad efectivos<sup>15</sup>.

- Cálculo de la varianza combinada,  $S_p^2$

$$S_p^2 = \frac{S_a^2(n_a - 1) + S_b^2(n_b - 1)}{n_a + n_b - 2}$$

Reemplazando los valores conocidos:

$$S_p^2 = \frac{0,0258(3 - 1) + 0,1075(3 - 1)}{3 + 3 - 2} = 0,07$$

- Cálculo del estadístico de la prueba  $t$

$$t = \frac{|\bar{X}_a - \bar{X}_b|}{\sqrt{\frac{S_p^2}{n_a} + \frac{S_p^2}{n_b}}} = \frac{|4,07 - 4,60|}{\sqrt{\frac{0,07}{3} + \frac{0,07}{3}}} = 2,53$$

- Cálculo del grado de libertad combinado  $u_p$

$$u_p = n_a + n_b - 2 = 3 + 3 - 2 = 4$$

---

<sup>15</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Secciones 700 y 800-materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos: INV E-822-13 Comparación estadística de dos juegos de datos, numeral 6.2.2. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, p. E 822-6.

- Cálculo del valor t crítico ( $t_{crit}$ )

Del Cuadro 48, se obtiene el valor crítico de t ( $t_{crit}$ ) a partir del grado de libertad combinado y para un nivel de significación  $\alpha$  igual a 1,00%, por lo tanto, el valor de  $t_{crit} = 4,60$ .

Cuadro 48. Valores de distribución t para  $\alpha = 1.00\%$  (Cuadro parcial)

DISTRIBUCIÓN t STUDENT												
Nivel de Significación	0,1%	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	10,0%
Grados de libertad	Values of t											
1	636,5776	127,3211	63,6559	42,4334	31,8210	25,4519	21,2051	18,1707	15,8945	14,1235	12,7062	6,3137
2	31,5998	14,0892	9,9250	8,0728	6,9645	6,2054	5,6428	5,2039	4,8487	4,5534	4,3027	2,9200
3	12,9244	7,4532	5,8408	5,0473	4,5407	4,1765	3,8961	3,6700	3,4819	3,3216	3,1824	2,3534
4	8,6101	5,5975	4,6041	4,0880	3,7469	3,4954	3,2976	3,1355	2,9985	2,8803	2,7765	2,1318
5	6,8685	4,7733	4,0321	3,6338	3,3649	3,1634	3,0029	2,8699	2,7565	2,6579	2,5706	2,0150
6	5,9587	4,3168	3,7074	3,3723	3,1427	2,9687	2,8289	2,7123	2,6122	2,5247	2,4469	1,9432
7	5,4081	4,0294	3,4995	3,2031	2,9979	2,8412	2,7146	2,6083	2,5168	2,4363	2,3646	1,8946
8	5,0414	3,8325	3,3554	3,0851	2,8965	2,7515	2,6338	2,5347	2,4490	2,3735	2,3060	1,8595

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Secciones 700 y 800-Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos: I.N.V.E-822 Comparación estadística de dos juegos de datos. Tabla 822 – 11. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, p. E 822-23.

**Prueba t:** Una vez determinados los valores de t y  $t_{crit}$  se tienen las siguientes dos situaciones:

- Si  $t \geq t_{crit}$ , las medias de la muestra patrón y la muestra con adición de fibra sintética son significativamente diferentes
- Si  $t < t_{crit}$ , las medias de la muestra patrón y la muestra con adición de fibra sintética no son significativamente diferentes

Como los valores de t y  $t_{crit}$  son 2,53 y 4,60 respectivamente, se tiene que  $t < t_{crit}$ , lo cual significa, que las medias de los módulos de rotura obtenidos para las dos muestras de concreto con y sin adición de fibra sintética no son significativamente diferentes, por lo tanto, en la formulación de la prueba de hipótesis se tiene la hipótesis nula, ya que la inclusión de 55,00g de macrofibra Toc Fibra 500 en la mezcla de concreto de la muestra patrón no aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto. A continuación se presentan la comparación estadística de la muestra patrón versus cada una de las muestras de concreto con adición de fibra sintética.

En el Cuadro 49 se observa que las muestras denominadas F1-I-T-3 y F1-I-T-4, las cuales corresponden a muestras de concreto con adición de 105,20g y 130,00g de macrofibras Toc fibra 500 respectivamente, son las únicas muestras que presentan incremento en el módulo de rotura del concreto respecto a la

muestra patrón, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula para estas dos muestras y se comprueba que la dosificación recomendada por el fabricante de la fibra sintética (1,00Kg/m<sup>3</sup> de concreto la cual equivale a 105,20g de fibra sintética por bulto de cemento) corresponde a la dosificación óptima para el diseño de mezcla empleado, ya que se obtiene incremento en el módulo de rotura del concreto. Las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-T-1, F1-I-T-2 y F1-I-T-5 no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón, por lo tanto, la inclusión de 55,00g, 80,00g y 155,00g de fibras sintéticas en las mezclas de concreto no aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

Cuadro 49. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500

MUESTRA	Patrón	F1-I-T-1	F1-I-T-2	F1-I-T-3	F1-I-T-4	F1-I-T-5
MR-1 (MPa)	3,95	4,65	4,95	5,20	5,55	5,40
MR-2 (MPa)	4,25	4,90	4,55	5,40	5,20	4,50
MR-3 (MPa)	4,00	4,25	4,15	4,90	5,05	4,40
Suma (MPa)	12,20	13,80	13,65	15,50	15,80	14,30
Promedio (Mpa)	4,07	4,60	4,55	5,17	5,27	4,77
Varianza (Mpa)	0,03	0,11	0,16	0,06	0,07	0,30
$F = S_b^2/S_a^2$		4,16	6,19	2,45	2,55	11,74
Grados de libertad	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		199,01	199,01	199,01	199,01	199,01
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$Sp^2 =$		0,07	0,09	0,04	0,05	0,16
t =		2,53	1,94	6,38	6,86	2,11
Up =		4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
tcrit =		4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son diferentes	Son diferentes	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 50 se observa que las muestras denominadas F1-I-SF-2 y F1-I-SF-3, las cuales corresponden a muestras de concreto con adición de 220,92g y 252,48g de macrofibras Tuf Strand SF respectivamente, son las únicas muestras que presentan incremento en el módulo de rotura del concreto respecto a la muestra patrón, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula para estas dos muestras y se comprueba que la dosificación recomendada por el fabricante de la fibra sintética (1,80Kg/m<sup>3</sup> de concreto la cual equivale a 189.36g de fibra sintética por bulto de cemento) no corresponde a la dosificación óptima para el diseño de mezcla empleado, ya que con dosificaciones entre los 220,92g y 252,48g de estas fibras sintéticas si se obtiene incremento en el módulo de rotura del concreto. Las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-SF-1, F1-I-SF-4

y F1-I-SF-5 no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón, por lo tanto, la inclusión de 189,36g, 284,04g y 315,60g de fibras sintéticas en las mezclas de concreto no aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

Cuadro 50. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

MUESTRA	Patrón	F1-I-SF-1	F1-I-SF-2	F1-I-SF-3	F1-I-SF-4	F1-I-SF-5
MR-1 (MPa)	3,95	4,40	4,70	4,90	4,00	4,20
MR-2 (MPa)	4,25	3,85	4,65	4,95	4,00	4,00
MR-3 (MPa)	4,00	4,60	4,70	4,75	4,10	4,35
Suma (MPa)	12,20	12,85	14,05	14,60	12,10	12,55
Promedio (Mpa)	4,07	4,28	4,68	4,87	4,03	4,18
Varianza (Mpa)	0,03	0,15	0,00	0,01	0,00	0,03
$F = Sb^2/Sa^2$		5,84	31,00	2,38	7,75	1,19
Grados de libertad	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$\alpha =$		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$F_{crit} =$		199,01	199,01	199,01	199,01	199,01
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$Sp^2 =$		0,09	0,01	0,02	0,01	0,03
$t =$		0,89	6,54	7,24	0,34	0,85
$Up =$		4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
$tcrit =$		4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
Medias muestrales		Son iguales	Son diferentes	Son diferentes	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 51 se observa que las muestras de concreto con incorporación de microfibras sintéticas Fiber Strand N no aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula para estas muestras de concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón.

Cuadro 51. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

MUESTRA	Patrón	F1-I-N-1	F1-I-N-2	F1-I-N-3	F1-I-N-4	F1-I-N-5
MR-1 (MPa)	3,95	4,05	4,50	4,10	4,35	4,40
MR-2 (MPa)	4,25	4,30	4,40	3,95	4,50	4,35
MR-3 (MPa)	4,00	4,10	4,60	4,45	4,40	4,35
Suma (MPa)	12,20	12,45	13,50	12,50	13,25	13,10
Promedio (Mpa)	4,07	4,15	4,50	4,17	4,42	4,37
Varianza (Mpa)	0,03	0,02	0,01	0,07	0,01	0,00
$F = Sb^2/Sa^2$		1,48	2,58	2,55	4,43	31,00
Grados de libertad	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00

Cuadro 51. (Continuación)

MUESTRA	Patrón	F1-I-N-1	F1-I-N-2	F1-I-N-3	F1-I-N-4	F1-I-N-5
$\alpha =$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fcrit =	199,01	199,01	199,01	199,01	199,01	199,01
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		0,02	0,02	0,05	0,02	0,01
t =		0,69	3,96	0,57	3,41	3,18
Up =		4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
tcrit =		4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 52 se observa que las muestras de concreto con incorporación de microfibras sintéticas Sika Fiber AD no aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula para estas muestras de concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón. No obstante, las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-AD-5 y la muestra patrón presenta diferencia significativa, lo cual indicaría incremento en la resistencia del módulo de rotura por la incorporación de la dosificación utilizada, sin embargo, dicho incremento está asociado a la propia resistencia del concreto, ya que la experiencia adquirida a través de diferentes investigaciones indica que el uso de microfibras sintéticas en el concreto no aporta resistencia en el módulo de rotura del concreto.

Cuadro 52. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

MUESTRA	Patrón	F1-I-AD-1	F1-I-AD-2	F1-I-AD-3	F1-I-AD-4	F1-I-AD-5
MR-1 (MPa)	3,95	4,35	4,55	4,35	4,05	5,15
MR-2 (MPa)	4,25	4,60	4,30	4,05	4,95	4,80
MR-3 (MPa)	4,00	4,00	5,70	4,20	4,90	4,80
Suma (MPa)	12,20	12,95	14,55	12,60	13,90	14,75
Promedio (Mpa)	4,07	4,32	4,85	4,20	4,63	4,92
Varianza (Mpa)	0,03	0,09	0,56	0,02	0,26	0,04
$F = Sb^2/Sa^2$		3,52	21,58	1,15	9,90	1,58
Grados de libertad	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$\alpha =$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fcrit =	199,01	199,01	199,01	199,01	199,01	199,01
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		0,06	0,29	0,02	0,14	0,03
t =		1,27	1,78	1,05	1,85	5,70
Up =		4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
tcrit =		4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son diferentes

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 53 se observa que las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55 no aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto, por lo tanto, se acepta la hipótesis nula para estas muestras de concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón.

Cuadro 53. Comparación estadística módulos de rotura (MR) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

MUESTRA	Patrón	F1-I-F-1	F1-I-F-2	F1-I-F-3	F1-I-F-4	F1-I-F-5
MR-1 (MPa)	3,95	4,25	4,25	4,05	4,10	4,60
MR-2 (MPa)	4,25	4,00	4,25	3,80	4,65	4,00
MR-3 (MPa)	4,00	4,45	4,40	4,25	3,75	4,70
Suma (MPa)	12,20	12,70	12,90	12,10	12,50	13,30
Promedio (Mpa)	4,07	4,23	4,30	4,03	4,17	4,43
Varianza (Mpa)	0,026	0,051	0,008	0,051	0,206	0,143
$F = Sb^2/Sa^2$		1,97	3,44	1,97	7,97	5,55
Grados de libertad	2	2	2	2	2	2
$\alpha =$	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =	199,012	199,012	199,012	199,012	199,012	199,012
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$Sp^2 =$		0,038	0,017	0,038	0,116	0,085
t =		1,043	2,214	0,209	0,360	1,544
Up =		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
tcrit =		4,604	4,604	4,604	4,604	4,604
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### 4.3 COMPARACIÓN ESTADÍSTICA MÓDULO DE ELASTICIDAD MUESTRA PATRÓN VERSUS MÓDULOS DE ELASTICIDAD MUESTRAS CON ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS

La comparación estadística entre los valores obtenidos de módulo de elasticidad de la muestra patrón versus los valores obtenidos de las diferentes muestras modificadas con adición de fibras sintéticas en diferentes dosificaciones, se realiza con base a la prueba t, con el fin de establecer si los promedios de la muestra patrón y las muestras con adición de fibras sintéticas son equivalentes a un mismo nivel de significancia. Con base al numeral 7.1 de la norma INV E-424, el módulo de elasticidad se calcula con aproximación a 200MPa, sin embargo para la comparación estadística de los módulos de elasticidad de la muestra patrón versus cada muestra con incorporación de fibras sintéticas no se tiene en cuenta dicha aproximación. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la comparación estadística de la prueba t para los módulos de elasticidad de la muestra patrón versus cada una de las muestras con adición de fibras sintéticas,

siguiendo la metodología descrita en la norma INV E-822-13 “Comparación estadística de dos juegos de datos” del INVIAS.

En el Cuadro 54 se observa que las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Toc Fibra 500 no aportan incremento en el módulo de elasticidad del concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de elasticidad de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de elasticidad de la muestra patrón.

Cuadro 54. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500

MUESTRA	Patrón	F1-I-T-1	F1-I-T-2	F1-I-T-3	F1-I-T-4	F1-I-T-5
E-1 (MPa)	37481,59	31001,51	35717,95	33954,53	31754,07	38414,72
E-2 (MPa)	32247,89	34301,66	37869,77	38932,89	36269,69	32100,58
Suma (MPa)	69729,48	65303,17	73587,72	72887,42	68023,76	70515,30
Promedio (MPa)	34864,74	32651,59	36793,86	36443,71	34011,88	35257,65
Varianza (MPa)	13695807,85	5445495,01	2315164,66	12392034,14	10195411,99	19934181,97
$F = S_b^2/S_a^2$		2,52	5,92	1,11	1,34	1,46
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
$F_{crit} =$		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$Sp^2 =$		9570651,43	8005486,25	13043920,99	11945609,92	16814994,91
$t =$		0,72	0,68	0,44	0,25	0,10
$Up =$		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$t_{crit} =$		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 55 se observa que las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Tuf Strand SF no aportan incremento en el módulo de elasticidad del concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de elasticidad de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de elasticidad de la muestra patrón.

Cuadro 55. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

MUESTRA	Patrón	F1-I-SF-1	F1-I-SF-2	F1-I-SF-3	F1-I-SF-4	F1-I-SF-5
E-1 (MPa)	37481,59	41316,12	56241,49	40305,96	40543,68	46071,24
E-2 (MPa)	32247,89	42111,20	39602,96	32147,42	37829,73	44916,26
Suma (MPa)	69729,48	83427,32	95844,45	72453,38	78373,41	90987,50
Promedio (MPa)	34864,74	41713,66	47922,23	36226,69	39186,71	45493,75



Cuadro 55. (Continuación)

MUESTRA	Patrón	F1-I-SF-1	F1-I-SF-2	F1-I-SF-3	F1-I-SF-4	F1-I-SF-5
Varianza (MPa)	13695807,85	316076,10	138420340,28	33280887,47	3682762,30	666989,40
$F = S_b^2/S_a^2$		43,33	10,11	2,43	3,72	20,53
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$S_p^2 =$		7005941,97	76058074,06	23488347,66	8689285,07	7181398,62
t =		2,59	1,50	0,28	1,47	3,97
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 56 se observa que las muestras de concreto con incorporación de microfibras sintéticas Fiber Strand N no aportan incremento en el módulo de elasticidad del concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de elasticidad de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de elasticidad de la muestra patrón.

Cuadro 56. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

MUESTRA	Patrón	F1-I-N-1	F1-I-N-2	F1-I-N-3	F1-I-N-4	F1-I-N-5
E-1 (MPa)	37481,59	37541,75	33414,75	31133,23	35570,95	35342,08
E-2 (MPa)	32247,89	37062,18	32544,75	0,00	31750,98	46224,19
Suma (MPa)	69729,48	74603,93	65959,50	31133,23	67321,93	81566,27
Promedio (MPa)	34864,74	37301,97	32979,75	15566,62	33660,97	40783,14
Varianza (MPa)	13695807,85	114993,69	378450,00	484639005,12	7296085,40	59210159,03
$F = S_b^2/S_a^2$		119,10	36,19	35,39	1,88	4,32
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$S_p^2 =$		6905400,77	7037128,92	249167406,48	10495946,62	36452983,44
t =		0,93	0,71	1,22	0,37	0,98
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 57 se observa que las muestras de concreto con incorporación de microfibras sintéticas Sika Fiber AD no aportan incremento en el módulo de elasticidad del concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de

elasticidad de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de elasticidad de la muestra patrón.

Cuadro 57. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

MUESTRA	Patrón	F1-I-AD-1	F1-I-AD-2	F1-I-AD-3	F1-I-AD-4	F1-I-AD-5
E-1 (MPa)	37481,59	38886,25	45161,37	35724,42	39209,07	38207,10
E-2 (MPa)	32247,89	42723,29	38454,69	40302,72	43933,53	41599,20
Suma (MPa)	69729,48	81609,54	83616,06	76027,14	83142,60	79806,30
Promedio (MPa)	34864,74	40804,77	41808,03	38013,57	41571,30	39903,15
Varianza (MPa)	13695807,85	7361437,98	22489778,31	10480415,45	11160261,15	5753171,20
$F = S_b^2/S_a^2$		1,86	1,64	1,31	1,23	2,38
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$Sp^2 =$		10528622,91	18092793,08	12088111,65	12428034,50	9724489,52
t =		1,83	1,63	0,91	1,90	1,62
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 58 se observa que las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55 no aportan incremento en el módulo de elasticidad del concreto, ya que las medias muestrales de los módulos de elasticidad de las muestras con adición de fibras sintéticas no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de elasticidad de la muestra patrón.

Cuadro 58. Comparación estadística módulos de elasticidad (E) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

MUESTRA	Patrón	F1-I-F-1	F1-I-F-2	F1-I-F-3	F1-I-F-4	F1-I-F-5
E-1 (MPa)	37481,59	39573,04	38363,57	42829,61	40896,87	38177,01
E-2 (MPa)	32247,89	38027,67	40009,23	36422,01	37009,67	35239,25
Suma (MPa)	69729,48	77600,71	78372,80	79251,62	77906,54	73416,26
Promedio (MPa)	34864,74	38800,36	39186,40	39625,81	38953,27	36708,13
Varianza (MPa)	13695807,85	1194084,22	1354098,42	20528668,88	7555161,92	4315216,91
$F = S_b^2/S_a^2$		11,47	10,11	1,50	1,81	3,17
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%

Cuadro 58. (Continuación)

MUESTRA	Patrón	F1-I-F-1	F1-I-F-2	F1-I-F-3	F1-I-F-4	F1-I-F-5
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		7444946,03	7524953,13	17112238,36	10625484,88	9005512,38
t =		1,44	1,58	1,15	1,25	0,61
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

#### 4.4 COMPARACIÓN ESTADÍSTICA RELACIÓN DE POISSON MUESTRA PATRÓN VERSUS RELACIÓN DE POISSON MUESTRAS CON ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS

La comparación estadística entre los valores obtenidos de la relación de Poisson de la muestra patrón versus los valores obtenidos de las diferentes muestras modificadas con adición de fibras sintéticas en diferentes dosificaciones, se realiza con base a la prueba t, con el fin de establecer si los promedios de la muestra patrón y las muestras con adición de fibras sintéticas son equivalentes a un mismo nivel de significancia. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la comparación estadística de la prueba t para las relaciones de Poisson de la muestra patrón versus cada una de las muestras con adición de fibras sintéticas, siguiendo la metodología descrita en la norma INV E-822-13 “Comparación estadística de dos juegos de datos” del INVIAS.

En el Cuadro 59 se observa que la relación de Poisson de la muestra patrón versus las relaciones de Poisson de las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Toc Fibra 500, no son significativamente diferentes ya que sus medias muestrales son iguales, por lo tanto, la incorporación de estas macrofibras no aportan incremento en la relación de Poisson del concreto.

Cuadro 59. Comparación estadística relación de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Toc Fibra 500

MUESTRA	Patrón	F1-I-T-1	F1-I-T-2	F1-I-T-3	F1-I-T-4	F1-I-T-5
$\mu_1$	0,25	0,24	0,21	0,24	0,26	0,34
$\mu_2$	0,32	0,24	0,35	0,17	0,32	0,39
Suma	0,58	0,48	0,55	0,41	0,58	0,73
Promedio	0,29	0,24	0,28	0,21	0,29	0,36
Varianza	0,0023	0,0000	0,0095	0,0026	0,0016	0,0010
$F = Sb^2/Sa^2$		345,74	4,09	1,13	1,41	2,28

Cuadro 59. (Continuación)

MUESTRA	Patrón	F1-I-T-1	F1-I-T-2	F1-I-T-3	F1-I-T-4	F1-I-T-5
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		0,0012	0,0059	0,0025	0,0020	0,0017
t =		1,42	0,15	1,66	0,01	1,82
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 60 se observa que la relación de Poisson de la muestra patrón versus las relaciones de Poisson de las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Tuf Strand SF, no son significativamente diferentes ya que sus medias muestrales son iguales, por lo tanto, la incorporación de estas macrofibras no aportan incremento en la relación de Poisson del concreto.

Cuadro 60. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Tuf Strand SF

MUESTRA	Patrón	F1-I-SF-1	F1-I-SF-2	F1-I-SF-3	F1-I-SF-4	F1-I-SF-5
$\mu_1$	0,25	0,16	0,65	0,26	0,17	0,35
$\mu_2$	0,32	0,32	0,18	0,22	0,31	0,17
Suma	0,58	0,48	0,83	0,48	0,49	0,53
Promedio	0,29	0,24	0,42	0,24	0,24	0,26
Varianza	0,0023	0,0116	0,1066	0,0006	0,0096	0,0161
$F = Sb^2/Sa^2$		5,00	45,80	3,89	4,13	6,92
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		0,0070	0,0545	0,0015	0,0060	0,0092
t =		0,59	0,54	1,29	0,60	0,27
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 61 se observa que la relación de Poisson de la muestra patrón versus las relaciones de Poisson de las muestras de concreto con incorporación

de microfibras sintéticas Fiber Strand N, no son significativamente diferentes ya que sus medias muestrales son iguales, por lo tanto, la incorporación de estas microfibras no aportan incremento en la relación de Poisson del concreto.

Cuadro 61. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Fiber Strand N

MUESTRA	Patrón	F1-I-N-1	F1-I-N-2	F1-I-N-3	F1-I-N-4	F1-I-N-5
$\mu_1$	0,25	0,40	0,30	0,17	0,34	0,17
$\mu_2$	0,32	0,28	0,29	0,00	0,22	0,27
Suma	0,58	0,68	0,58	0,17	0,55	0,44
Promedio	0,29	0,34	0,29	0,08	0,28	0,22
Varianza	0,0023	0,0064	0,0001	0,0143	0,0072	0,0049
$F = S_b^2/S_a^2$		2,74	33,11	6,16	3,08	2,12
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
$S_p^2 =$		0,0044	0,0012	0,0083	0,0048	0,0036
t =		0,78	0,10	2,24	0,18	1,13
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 62 se observa que la relación de Poisson de la muestra patrón versus las relaciones de Poisson de las muestras de concreto con incorporación de microfibras sintéticas Sika Fiber AD, no son significativamente diferentes ya que sus medias muestrales son iguales, por lo tanto, la incorporación de estas microfibras no aportan incremento en la relación de Poisson del concreto.

Cuadro 62. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de microfibras Sika Fiber AD

MUESTRA	Patrón	F1-I-AD-1	F1-I-AD-2	F1-I-AD-3	F1-I-AD-4	F1-I-AD-5
$\mu_1$	0,25	0,21	0,43	0,22	0,25	0,32
$\mu_2$	0,32	0,24	0,20	0,32	0,42	0,18
Suma	0,58	0,45	0,63	0,54	0,67	0,49
Promedio	0,29	0,22	0,31	0,27	0,33	0,25
Varianza	0,0023	0,0004	0,0256	0,0054	0,0139	0,0098
$F = S_b^2/S_a^2$		5,86	10,99	2,30	5,96	4,21
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Cuadro 62. (Continuación)

MUESTRA	Patrón	F1-I-AD-1	F1-I-AD-2	F1-I-AD-3	F1-I-AD-4	F1-I-AD-5
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		0,0014	0,0140	0,0038	0,0081	0,0061
t =		1,75	0,20	0,33	0,50	0,56
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 63 se observa que la relación de Poisson de la muestra patrón versus las relaciones de Poisson de las muestras de concreto con incorporación de macrofibras sintéticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55, no son significativamente diferentes ya que sus medias muestrales son iguales, por lo tanto, la incorporación de estas macrofibras no aportan incremento en la relación de Poisson del concreto.

Cuadro 63. Comparación estadística relaciones de Poisson ( $\mu$ ) de la muestra patrón versus muestra patrón con adición de macrofibras Sika Fiber Force PP/PE-700/55

MUESTRA	Patrón	F1-I-F-1	F1-I-F-2	F1-I-F-3	F1-I-F-4	F1-I-F-5
$\mu_1$	0,25	0,23	0,17	0,41	0,27	0,37
$\mu_2$	0,32	0,23	0,27	0,19	0,26	0,33
Suma	0,58	0,46	0,45	0,60	0,54	0,71
Promedio	0,29	0,23	0,22	0,30	0,27	0,35
Varianza	0,0023	0,0000	0,0051	0,0233	0,0000	0,0008
$F = S_b^2/S_a^2$		12935,27	2,18	10,02	64,76	3,02
Grados de libertad	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\alpha =$		1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Fcrit =		16212,46	16212,46	16212,46	16212,46	16212,46
Variabilidad		No presenta	No presenta	No presenta	No presenta	No presenta
Sp <sup>2</sup> =		0,0012	0,0037	0,0128	0,0012	0,0016
t =		1,69	1,07	0,09	0,58	1,62
Up =		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
tcrit =		9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
Medias muestrales		Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales	Son iguales

Fuente: Elaboración propia, 2018.

## 5. CONCLUSIONES

La inclusión de microfibras sintéticas en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto. La inclusión de algunas macrofibras sintéticas en las mezclas de concreto aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto de acuerdo a la dosificación utilizada, la cual podrá variar de acuerdo a las resistencias requeridas, uso del concreto y en especial a la calidad, cantidad, tamaño y forma de los agregados utilizados en la producción del concreto.

Las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-T-1, F1-I-T-2 y F1-I-T-5, las cuales presentan incorporación de macrofibras sintéticas Toc fibra 500 en dosificaciones de 55,00g, 80,00g y 155,00g respectivamente, no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón, por lo tanto, la inclusión de estas macrofibras sintéticas en las dosificaciones mencionadas en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

Las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-T-3 y F1-I-T-4 no son iguales respecto a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón, por lo tanto, la inclusión de 105,20g y 130,00g de macrofibras sintética Toc fibra 500 en las mezclas de concreto aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

La dosificación recomendada por el fabricante de la macrofibra sintéticas Toc fibra 500 corresponde a 1,00 kg de fibra por metro cúbico de concreto, la cual equivale a 105,20g de fibra sintética por bulto de cemento para el diseño de mezcla utilizado, dosificaciones entre los 105.20g y 130.00g corresponden a la óptima para el diseño de mezcla empleado, ya que aportan incremento de resistencia en el módulo de rotura del concreto.

Las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-SF-1, F1-I-SF-4 y F1-I-SF-5, las cuales presentan incorporación de macrofibras sintéticas Tuf Strand SF en dosificaciones de 189,36g, 284,04g y 315,60g respectivamente, no son significativamente diferentes a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón, por lo tanto, la inclusión de estas macrofibras sintéticas en las dosificaciones mencionadas en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

Las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras F1-I-SF-2 y F1-I-SF-3 no son iguales respecto a la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón, por lo tanto, la inclusión de 220,92g y 252,48g de macrofibra sintética Tuf Strand SF en las mezclas de concreto aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto.

La dosificación recomendada por el fabricante de la macrofibra sintéticas Tuf Strand SF corresponde a 1,80 kg de fibra por metro cúbico de concreto, la cual equivale a 189,36g de fibra sintética por bulto de cemento para el diseño de mezcla utilizado, dicha dosificación no corresponde a la óptima para el diseño de mezcla empleado, ya que no aporta resistencia en el módulo de rotura del concreto. Dosificaciones entre los 220,92g y 252,48g de macrofibras sintéticas Tuf Strand representan aporte en el módulo de rotura del concreto para el diseño de mezcla patrón.

La inclusión de las microfibras sintéticas Fiber Strand N en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto, ya que la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón versus las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras de concreto con adición de estas microfibras sintéticas son iguales.

La inclusión de las microfibras sintéticas Sika Fiber AD en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto, ya que la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón versus las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras de concreto con adición de estas microfibras sintéticas son iguales.

La inclusión de las macrofibras sintéticas Sika Fiber Force PP/PE-700/55 en las mezclas de concreto NO aportan resistencia en el módulo de rotura del concreto, ya que la media muestral del módulo de rotura de la muestra patrón versus las medias muestrales de los módulos de rotura de las muestras de concreto con adición de estas macrofibras sintéticas son iguales.

De la comparación estadística para los módulos de elasticidad se obtiene que las medias muestrales de la muestra patrón versus las medias muestrales de cada muestra de concreto con adición de macrofibras y microfibras sintéticas son iguales, y no presentan diferencia significativa en sus módulos de elasticidad, por lo tanto, la incorporación de estas fibras sintéticas en el concreto no proporcionan incremento en los módulos de elasticidad del concreto.



Las relaciones de Poisson de la muestra patrón versus las relaciones de Poisson de las muestras de concreto con incorporación de macrofibras y microfibras sintéticas no son significativamente diferentes, ya que sus medias muestrales son iguales, por lo tanto, la incorporación de estas fibras sintéticas en el concreto no aportan incremento en la relación de Poisson.

Se observa que las fallas a compresión de los especímenes cilíndricos sin fibras sintéticas fueron súbitas, mientras que las fallas a compresión de los especímenes cilíndricos con inclusión de fibras sintéticas fueron dúctiles, mantuvieron unidas las partículas de concreto después de la falla, lo que produce una mayor absorción de energía permitiendo mayores deformaciones y aplicaciones de carga después del agrietamiento del concreto.

El valor típico de la relación de Poisson para el concreto es de 0,15, sin embargo algunas investigaciones determinan que la relación de Poisson para concretos convencionales puede variar entre 0.15 y 0.20 y es común encontrar valores fuera de este intervalo. Los valores de la relación de Poisson del concreto obtenidos en la investigación son superiores a los típicos, sin embargo dichos valores dependen de muchos factores entre los cuales están las condiciones climáticas al momento del ensayo, el ensayo como tal y calibración del equipo, la resistencia del concreto, las propiedades de los agregados y del cemento, entre otros factores.

Aunque existen muchas investigaciones relacionadas con el uso de fibras sintéticas tanto microfibras como macrofibras en el concreto, no se tiene mucha experiencia medible en obra, por lo tanto, se requieren realizar más experimentaciones en obra, que permitan tener mayor conocimiento del comportamiento real del concreto modificado con fibras sintéticas ante el efecto de las cargas del tránsito, con miras a diseñar y construir pavimentos más económicos y durables.

El uso de las macrofibras sintéticas en el concreto ayuda a controlar la aparición de las fisuras y en el caso de que ya existan, controlan el ancho y la propagación de las fisuras. El comportamiento mecánico de los concretos reforzados con macrofibras sintéticas, depende directamente de la dosificación usada, distribución y posición de las fibras dentro de la matriz de concreto, resistencia a la tracción y anclaje de las fibras, lo cual puede ayudar a incrementar la resistencia del concreto a la flexión.

Las fibras sintéticas se pueden adicionar en cualquier etapa de fabricación del concreto antes de la colocación y se debe evitar el apelmazamiento de las fibras y con el fin de garantizar una distribución uniforme de las fibras dentro de la matriz de concreto, se deberá prolongar el tiempo de mezclado normal del concreto entre tres a cinco minutos adicionales para alcanzar los mejores resultados.

Teniendo en cuenta que los resultados de resistencia del concreto a la compresión de las muestras patrón versus las muestras de concreto con adición de fibras sintéticas presentan alta variabilidad, la dosificación y la posición de las fibras sintéticas respecto al plano de falla de los cilindros de concreto, así como la toma de los cilindros, curado y transporte pudieron incidir en dicha variabilidad.

Para las muestras de concreto donde se determinó que el uso de las fibras sintéticas aporta resistencia en el módulo de rotura del concreto, este incremento de resistencia está asociado a la dosificación de la fibra utilizada, distribución dentro de la matriz de concreto y posición de las fibras respecto al plano de falla de las vigas prismáticas.

Teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad del concreto varía en función del módulo de elasticidad del agregado grueso, la NSR-10 en el numeral C.8.5 "Módulo de elasticidad" establece dos fórmulas generales para determinar el módulo de elasticidad del concreto en función de la densidad del concreto y en función del origen geológico de los agregados gruesos. Los módulos de elasticidad obtenidos en laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana para la muestra M1-3 y F1-I-N-5, muestra 3 comparados con los calculados por la NSR-10 presentan valores similares con los obtenidos mediante la expresión que relaciona la densidad del concreto, mientras que con los módulos obtenidos mediante el origen del agregado difieren significativamente.

La variabilidad en los resultados de los módulos de elasticidad calculados en los laboratorios de la UPTC y Universidad Javeriana, puede indicar deficiencia y/o falta de calibración en los equipos utilizados en los ensayos, lo que conlleva a que siempre se encuentren variaciones de resultados entre un laboratorio y otro, de igual manera, el uso de las diferentes correlaciones para el cálculo de módulo de elasticidad proporciona valores diferentes en los resultados calculados.

El módulo de elasticidad del concreto presenta una alta sensibilidad entre los esfuerzos y deformaciones a las que van estar sometidas las estructuras ante las diferentes sollicitaciones que pueden actuar sobre estas, por lo tanto, es

importante para el diseño y construcción de las estructuras conocer el valor real del módulo de elasticidad del concreto con el cual se va trabajar en obra, con el fin de construir obras económicas, resistentes y durables.

Los agregados finos y gruesos deben cumplir a cabalidad con los especificado en el artículo 500 “Pavimento de concreto hidráulico” para el nivel de tránsito determinado en el diseño del pavimento rígido. El uso de agregados tanto finos como gruesos que no cumplen con los requerimientos granulométricos, es decir, presentan una granulometría deficiente, requerirán mayor cantidad de cemento para alcanzar la resistencia de diseño, lo que conlleva a incrementar los costos de producción del concreto.

En algunos municipios del territorio Colombiano es usual realizar las mezclas de concreto para pavimentos rígidos en obra, lo cual implica tener mayor control de calidad en los agregados utilizados y en la fabricación de las mezclas de concreto, sin embargo, es común que la fabricación de las mezclas de concreto se realice con materiales pétreos provenientes de la zona del proyecto y en la mayoría de los casos estos no cumplen con las especificaciones de construcción y se acepte dichos materiales, ya sea por falta de control de calidad y/o desconocimiento de la normativa por parte de los profesionales que ejercen la supervisión, considerando que lo más importante es el cumplimiento de la resistencia en el concreto, ya sea por la toma de muestras prismáticas y/o cilíndricas.

Cuando se fabrican los concretos in-situ con los materiales disponibles de la zona del proyecto, es común encontrar que los agregados gruesos y finos no cumplen en especial con las gradaciones especificadas en la norma y el diseño de mezcla de concreto para un módulo de rotura especificado se realiza con base a métodos gráficos como los de Fuller y Thompson, Bolomey entre otros. El uso de agregados grueso y fino que no cumplan con las gradaciones especificadas en la norma implica mayor cantidad de pasta de cemento, lo que incrementa los costos de construcción de las obras.

El costo de producción de concreto por metro cúbico para la realización de la investigación está alrededor de los \$420.000 pesos m/cte y teniendo en cuenta los costos de cada una de las fibras sintéticas y las dosificaciones utilizadas en los diseños de mezcla de concreto, se muestra en la tabla 64 el incremento del costo en la producción del concreto. A corto plazo se incrementan los costos de producción del concreto y desde luego la construcción de las obras por la incorporación de las fibras sintéticas, sin embargo a largo plazo se pueden reducir los costos de mantenimiento de las estructuras y ampliar la vida útil de estas, por

tal razón es conveniente realizar el análisis técnico – económico en cuanto a la conveniencia del uso de las fibras sintéticas en las obras de construcción.

**Cuadro 64. Incremento del precio del concreto con inclusión de fibras sintéticas**

Tipo de fibra	Presentación fibra (Kg)	Precio fibra	Dosificación (Kg/m³)	Precio dosificación utilizada	Precio m³ concreto	Precio m³ concreto con fibras	Incremento precio (%)
TOC FIBRA 500	10,00	\$ 169.128,00	1,00	\$ 16.912,80	\$ 420.000,00	\$ 436.912,80	4,03
TUF STRAND SF	2,27	\$ 96.139,00	1,80	\$ 76.233,57	\$ 420.000,00	\$ 496.233,57	18,15
SIKA FIBER AD	1,00	\$ 22.789,00	1,00	\$ 22.789,00	\$ 420.000,00	\$ 442.789,00	5,43
SIKA FIBER FORCE	7,00	\$ 149.200,00	1,80	\$ 38.365,71	\$ 420.000,00	\$ 458.365,71	9,13
FIBER STRAND N	0,60	\$ 27.227,00	0,60	\$ 27.227,00	\$ 420.000,00	\$ 447.227,00	6,48

Fuente: Elaboración propia, 2018.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar para el diseño de mezclas de concreto utilizadas en la construcción de pavimentos rígidos materiales pétreos, cemento, agua y aditivos si se requieren, que cumplan con lo especificado en el artículo 500 “Pavimento de concreto hidráulico” y se debe rechazar cualquier material que no cumpla con lo especificado en dicho artículo, con el fin de garantizar la estabilidad y durabilidad de las estructuras de pavimento.

Teniendo en cuenta que el agregado grueso utilizado en el diseño de mezcla de concreto no cumple con las curvas granulométricas especificadas en la tabla 500-3 del artículo 500 “Pavimento de concreto hidráulico” se recomienda realizar la mezcla con otros materiales granulares con el fin de cumplir las curvas granulométricas, adicionalmente se debe cumplir con los demás requisitos establecidos en la tabla 500-4 para cada uno de los materiales mezclados.

Teniendo en cuenta que el agregado fino utilizado en el diseño de mezcla de concreto no cumple con las curvas granulométricas especificadas en la tabla 500-1 del artículo 500 “Pavimento de concreto hidráulico” se recomienda realizar la mezcla con otros materiales granulares con el fin de cumplir las curvas granulométricas, adicionalmente se debe cumplir con los demás requisitos establecidos en la tabla 500-2 para cada uno de los materiales mezclados.

Para la construcción in-situ del pavimento rígido de las vías internas de la plaza de ganado de la empresa Cerpagan S.A.S, se recomienda utilizar materiales que cumplan con lo especificado en el artículo 500 “Pavimento de concreto hidráulico” del INVIAS o utilizar concretos premezclados.

Con el fin de dar uso al acopio de los agregados existentes, se recomienda utilizar estos agregados en mezclas de concreto destinadas para la construcción de las placas de concreto de la zona de vehículos livianos, zona mercado de lazo, edificaciones, andenes, entre otras estructuras de concreto.

De acuerdo a los valores de módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio de la UPTC, Universidad Javeriana y calculados por diferentes correlaciones de la NSR-10, se recomienda realizar la calibración de los equipos de la UPTC con el fin de garantizar y/o ratificar los resultados de laboratorio para futuras investigaciones.

De acuerdo a la ficha técnica de cada una de las fibras sintéticas usadas en la presente investigación, el uso de las fibras sintéticas en el concreto no presentan absorción de agua, sin embargo, por el efecto costura que se produce dentro de la matriz de concreto y la dosificación de fibra utilizada, se presentó pérdida en la manejabilidad (reducción del asentamiento) de algunas muestras de concreto, lo cual, se pudo evidenciar en los ensayos de asentamientos realizados a las muestras fabricadas, por lo tanto, para futuras investigaciones que se requiera controlar el asentamiento de las muestras de concreto según la aplicación y manejabilidad requerida, se recomienda el uso de aditivos plastificantes.

Aunque todos los fabricantes presentan una dosificación recomendada para evitar apelmazamientos y obtener los mejores resultados de resistencia, esta dosificación podrá variar de acuerdo a las resistencias requeridas, uso del concreto y en especial a la calidad, cantidad, tamaño y forma de los agregados utilizados en la producción del concreto, por tal razón, se recomienda realizar la experimentación con los materiales disponibles de cada zona, que permita determinar la dosificación óptima que brinde los mejores resultados al concreto.

Al igual que las mallas electrosoldadas, el uso de las macrofibras ayudan a mejorar el comportamiento estructural de las losas, ya que estas se usan para reforzar las losas, sin embargo, no previenen el agrietamiento pero ayudan a controlar el ancho de las fisuras y mantenerlas unidas. Para la construcción de las zonas de parqueadero de vehículos livianos y mercado del lazo, se recomienda construir algunas placas de concreto con mallas electrosoldadas y otras placas con el uso de las macrofibras de la presente investigación, con el fin de evaluar cuales losas presentan los mejores comportamientos mecánicos ante la acción repetitiva de las cargas de los vehículos.

Se recomienda la construcción de algunos tramos viales dentro de la plaza de ganado del municipio de Sogamoso, con y sin el uso de las macrofibras sintéticas, con el fin de evaluar el comportamiento mecánico en el tiempo de las losas de concreto ante la acción repetitiva de las cargas de los vehículos, permitiendo continuar investigando el uso de las fibras en el concreto y así poder llevar mediciones reales en campo.

Para futuras investigaciones que se requiera controlar el asentamiento de las muestras de concreto según la aplicación y manejabilidad requerida, se recomienda el uso de aditivos plastificantes.

Aunque existen muchas investigaciones relacionadas con el uso de fibras, no se tiene mucha experiencia medible en campo, por lo tanto, se requieren realizar más experimentaciones en obra, que permitan tener mayor conocimiento del comportamiento real del concreto modificado con fibras sintéticas ante el efecto de las cargas del tránsito, con miras a diseñar y construir pavimentos más económicos y durables.

Se recomienda tener en cuenta la calibración y sensibilidad de los equipos que permita tener datos confiables, y posteriormente realizar modelaciones con los resultados obtenidos.

Para muestras de concreto con adición de fibras sintéticas se recomienda realizar la medición de la deflexión en las vigas ante los incrementos de carga.

Finalmente, se debe tener en cuenta los efectos de la temperatura en las muestra de concreto con y sin adición de fibras durante los procesos de fabricación, fraguado, curado y falla de los especímenes.

## BIBLIOGRAFIA

ACERO R, Juan Carlos. Pueden las fibras sintéticas reemplazar la armadura convencional?. {En línea}. Disponible en: ([http://www.aciperu.org/eventos/IX\\_Conv\\_Nov/04\\_Juan\\_Carlos\\_Acero\\_-\\_Pueden\\_fibras\\_sinteticas\\_sustituir.pdf](http://www.aciperu.org/eventos/IX_Conv_Nov/04_Juan_Carlos_Acero_-_Pueden_fibras_sinteticas_sustituir.pdf)).

AGUADO DE CEA, Antonio, et al. Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona). En: Ingeniería de construcción. Agosto, 2009. Vol. 24, no. 2, p. 119-140.

AIRE, Carlos; DÁVILA, Paula y MENDOZA, Carlos. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. En: Concreto y cemento investigación y desarrollo. Enero-Junio, 2011. Vol. 2, no. 2, p. 35-47.

APERADOR, William, CARRILLO, Julián y GONZALEZ, Giovanni. Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. En: Ingeniería Investigación y tecnología. Julio-Septiembre, 2013. Vol. XIV, No. 3, p. 435-450.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente: NSR – 10. Bogotá D.C.: AIS, 2010.

ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC:US. American: AASHTO, 1993.

BOADA MARCANO, Mónica de los Ángeles y PÉREZ NIEL, Edwin. Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. Trabajo de grado (Magíster en ingeniería civil). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil, 2011, 98 p.

BOADA MARCANO, Mónica de los Ángeles y REYES LIZCANO, Fredy. Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. En: Revista ciencia e ingeniería. Diciembre-Marzo, 2013. Vol. 34, no. 1, p. 13-20.

BOLIVAR GIRALDO, Orlando. Diseño de mezclas de hormigón: Métodos empíricos y analíticos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 2004. 58p.



CAMARGO PÉREZ, Nelson e HIGUERA SANDOVAL, Carlos. Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz. En: Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Junio-Octubre, 2016. 1-21, p. 1-21.

CARRILLO LEÓN, Julián; GALLO ARCINIEGAS, Lina P. y GONZALEZ PEÑUELA, Giovanni. Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzo de compresión. En: Universidad Militar Nueva Granada - Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Junio, 2013. Vol. 23-1, p.117-133.

CARRILLO, Julián y SILVA-PÁRAMO, Diego. Ensayos a flexión de losas de concreto sobre terreno reforzadas con fibras de acero. En: Ingeniería investigación y tecnología. Julio-Septiembre, 2016. Vol. 17, No. 3, p. 317-330.

CERÓN CUEVAS, Ismael Antonio, MILAGUY GIL, Carlos Uriel. Estado del arte de la incidencia de los polímeros en el diseño de mezcla del concreto. Estudio a nivel mundial. Trabajo de investigación. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería, programa de ingeniería civil. 2014, 4p. Disponible en repositorio institucional universidad católica de Colombia: (<http://hdl.handle.net/10983/1572>)

CHEM MASTERS DEL PERÚ S.A. Chema fibra ultrafina. Lima. 2014. 2p.

EUCLID CHEMICAL TOXEMENT, Toc fibra 500: Fibra de refuerzo secundario para concreto o mortero. Bogotá D.C.: 2011. 2p.

\_\_\_\_\_, Tuf strand sf: Fibras sintéticas estructurales. Bogotá D.C.: 2011. 3p.

EUCLID GROUP TOXEMENT, Fiberstrand N: Micro-fibra de nylon. Bogotá D.C.: 2014. 2p.

FARAGGI, Victor., JOFRÉ, Carlos. y KRAEMER, Carlos. Combined Effect of Traffic Loads and Thermal Gradients on Concrete Pavement Design. Committee on Rigid Pavement Design, transportation research record. No. 1136, p. 108-118.

GAIO GRAEFF, Angela, et al. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. En: Engineering Structures. December, 2012. Vol. 45, p. 385-395.

GARCÍA CALDERÓN, Johanna Alexandra. Determinación de la correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a la compresión del concreto (caso prevesa). Trabajo de grado (Ingeniero civil). Bucaramanga: Universidad pontificia bolivariana. Facultad de ingeniería civil, 2010, 111p.

GEOLOGÍA E INGENIERÍA DE PROYECTOS. Estudio de suelos para el proyecto de construcción de la plaza de ferias en el municipio de Sogamoso-Departamento de Boyacá. Sogamoso: GEOINPRO S.A.S., 2016, 97p.

GIACCIO, Graciela, et al. Uso de fibras sintéticas en hormigones para obras viales. En: Congreso Argentino de vialidad y tránsito. (XV: 2009: Buenos Aires). Facultad de Ingeniería U.N.L.P., LEMIT – Laboratorio de entrenamiento multidisciplinario para la investigación tecnológica.

GIRALDO BOLIVAR, Orlando. Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón. Trabajo para promoción a profesor asistente. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 1987, 186p.

GONZÁLEZ SALCEDO, Luis Octavio. Generalidades sobre las fibras artificiales: Módulo de lectura para la asignatura análisis de estructuras. Documento de trabajo. En: bdigital repositorio institucional UN Palmira. Octubre, 2012-Junio, 2017); p. 1-26.

GUÍAS DE CLASE de Carlos Hernando Higuera Sandoval MSc. Profesor del curso “Diseño avanzado de pavimentos” capítulo 1 – principios básicos, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2012; 91p.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_ capítulo 5 - mecánica de pavimentos rígidos, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, 2012; 45p.

GUIROLA, Marcela. Strength and performance of fiber-reinforced concrete composite slabs. Trabajo de grado (Master of science in civil engineering). Blacksburg: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001, 261p.

HEERALAL, M., RATHISH KUMAR, P., RAO, Y.V. Flexural fatigue characteristics of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete (SFRRAC). En: Architecture and civil engineering. 2009. Vol. 7, No. 1, p. 19-33.

HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. Revista Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Vol. 29, N°28. (2010); p. 73 – 92.

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO, ALVAREZ PABÓN, Jorge Alberto y LONDOÑO NARANJO, Cipriano. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín: ICPC; 2008. 114p.

INSTITUTO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN DE CHILE. Shotcrete – guía chilena del hormigón proyectado. Primera edición. Santiago. ICH. 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Capítulo 1 Aspectos generales: ART. 107 Control y aceptación de los trabajos. INVIAS 2013, 20p.

\_\_\_\_\_. Capítulo 5 Pavimentos de concreto: ART. 500 Pavimento de concreto hidráulico. INVIAS 2013, 74p.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Capítulo 5 Pavimentos de concreto: ART. 501 Suministro de cemento hidráulico. INVIAS 2013, 6p.

\_\_\_\_\_. Capítulo 6 Estructuras y drenajes: ART. 630 Concreto estructural. INVIAS 2013, 48p.

\_\_\_\_\_. Sección 400 – Concreto hidráulico: I.N.V.E-402 Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, 20p.

\_\_\_\_\_. Secciones 700 y 800-Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos: I.N.V.E-822 Comparación estadística de dos juegos de datos. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013. 24p.

\_\_\_\_\_. Secciones 700 y 800-Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos: I.N.V.E-823 Guía para el uso de cifras significativas y el redondeo en la verificación del cumplimiento de las especificaciones de construcción. Bogotá D.C.: INVIAS, 2013, 12p.

KERKHOFF, Beatrix, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. Skokie, Illinois, EE.UU.: PCA, 2004. 459p.

KHAZANOVICH, Lev, MACDONALD, Kevin y VANCURA, Mary. Structural analysis of pervious concrete pavement. En: Transportation research board 90th annual meeting. January, 2011, p. 1-17.

KUMARAVEI, A. y SUBRAMANI, T. Analysis of Polymer Fibre Reinforced Concrete Pavements by Using ANSYS. En: International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM). Mayo, 2016. Vol.5, no.5, p. 132-139.

LAURA HUANCA, Samuel. Diseño de mezclas de concreto. {En línea}. 22 Agosto 2017. Disponible en: (<https://www.researchgate.net/publication/267216538>).

MACÍAS SANCHEZ, Lucía y ORTIZ HERNÁNDEZ, Eduardo. Comparativo de resistencias de un hormigón convencional con el empleo de fibras metálicas y

sintéticas. {En línea}. Marzo 2018. Disponible en: (<https://www.eumed.net/rev/oel/2018/03/resistencias-hormigon.html>).

MANZANO VALBUENA, José. Evaluación del efecto en la contracción del concreto con fibras estructurales de polipropileno. Trabajo de grado (Ingeniería civil). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil, 2014, 76p.

MARTINEZ JIMENEZ, J., et al. La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos. En: Revista ingeniería de construcción. Abril, 2015. Vol. 20, no.1, p. 159-160.

MENDOZA VARGAS, Juan Ivan, VÁSQUEZ, Alberto y VILLA ARCHILA, Manuel Ricardo. Análisis del esfuerzo residual en concreto para pavimento rígido reforzado con fibras metálicas y sintéticas. Trabajo de grado (especialista en ingeniería de pavimentos). Bogotá, D.C: Universidad militar nueva granada. Facultad de ingeniería, 2012, 69p.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Hormigón el concreto en la práctica: ¿Qué, Por qué y cómo? CIP 24 Fibras sintéticas para el concreto. NRMCA. 2015. 2p.

NEOCLEOUS, Kyriacos, et al. Fibre reinforced roller compacted concrete transport pavements. Centre for Cement and Concrete, Department of Civil and Structural Engineering / The University of Sheffield, Sir Frederick Mappin Building, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, United Kingdom. 2011, 43p.

NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Colección del concreto - Tecnología del concreto – Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas. 3 ed. Bogotá D.C.: ASOCRETO, 2010. 228p.

RIVERA L., Gerardo A. Concreto simple: Resistencia del concreto. Universidad del Cauca, p.121-153.

RODRIGUEZ VILLAREAL, Fredy. Estudio del comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto para pavimentos reforzados con fibras metálicas. Trabajo de grado (Magíster en ingeniería civil). Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería civil, 2013, 55p.

SIKA, Hoja técnica de producto: sikafiber AD. Tocancipá: 2015. p 108-109. Versión 01.

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_: sikafiber Force PP/PE-700/55. Tocancipá: 2015. p 106-107. Versión 01.

SIKA Colombia S.A. Sika informaciones técnicas: curado del concreto. 2009. ISSN-0122-0594. 16p.

SIKA Colombia S.A.S. Concreto: Concreto reforzado con fibras. Bogotá, D.C. Sika, 2014. 23p.

\_\_\_\_\_. Construcción: Concreto reforzado con fibras. Bogotá, D.C. Sika informaciones técnicas, 2010. 26p.

SÍNTESIS de Juan Carlos Vidad Pereyra. Análisis del comportamiento del concreto con incorporación de fibras de polipropileno. Universidad agraria la molina. 2006.

VICROADS, Technical note: Cracks in concrete. No. 38 (Dec.-2010); 4p.

## ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO - CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

A partir de los ensayos de laboratorio realizados a los materiales utilizados para el diseño de mezcla se tiene la siguiente información:

**Caracterización de materiales:** se debe realizar la caracterización de los materiales, tanto a los agregados finos y gruesos como al cemento utilizado.

- Agregado grueso y fino: Para la caracterización de los materiales se realizan los siguientes ensayos:
  - **Granulometría:** Norma INV E-213-13 “Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino” y Norma INV E-214-13 “Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 µm (N° 200) en los agregados pétreos mediante lavado”

En el cuadro 1 se muestra la gradación obtenida para el agregado grueso; se trata de una grava mal gradada de color gris, de forma subangular con composición calcárea y compacidad suelta. De acuerdo a la clasificación unificada de suelos, el material se clasifica como una grava pobremente gradada (GP). El tamaño máximo nominal de la grava es de 2,54cm.

Cuadro 1. Resultados laboratorio de gradación del agregado grueso

MUESTRA: AGREGADO GRUESO				
TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
				100,00
3"	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	0,00	0,00	0,00	100,00
1 - 1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	61,00	2,35	2,35	97,65
3/4"	1603,90	61,91	64,26	35,74
1/2"	914,20	35,29	99,55	0,45
3/8"	2,70	0,10	99,66	0,34
N 4	3,20	0,12	99,78	0,22
N 8	1,00	0,04	99,82	0,18
N 16	0,80	0,03	99,85	0,15
N 30	0,80	0,03	99,88	0,12
N 50	0,70	0,03	99,91	0,09
N 100	0,90	0,03	99,94	0,06
N 200	0,90	0,03	99,98	0,02
FONDO	0,60	0,02	100,00	0,00
TOTAL	2590,70			

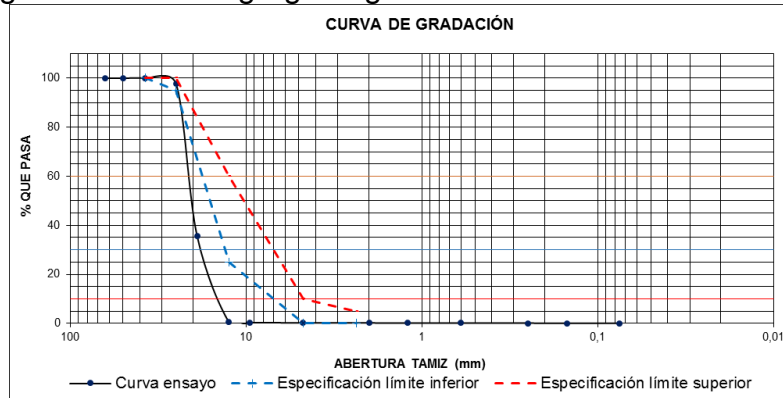
  

Wrec + Wsec (g)	2797,50
Wrec (g)	206,80
Wsec (g)	2590,70
Error %	0,00
GRAVA (%)	99,78
ARENA (%)	0,20
FINOS (%)	0,02
D10	14,26
D30	17,94
D60	21,35
Cc	1,06
Cu	1,50

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 1, se muestra la curva granulométrica obtenida para la grava y se observa que la gradación no cumple los requerimientos de la especificación.

Figura 1. Curva granulométrica agregado grueso



Fuente: Elaboración propia, 2018.

En el Cuadro 2 se muestra la gradación obtenida para el agregado fino; se trata de una arena limosa mal gradada de grano muy fino, color rojo claro, de forma subangular con composición cuarzosa y compacidad suelta. De acuerdo a la clasificación unificada de suelos, el material se clasifica como una arena limosa pobremente gradada (SP-SM).

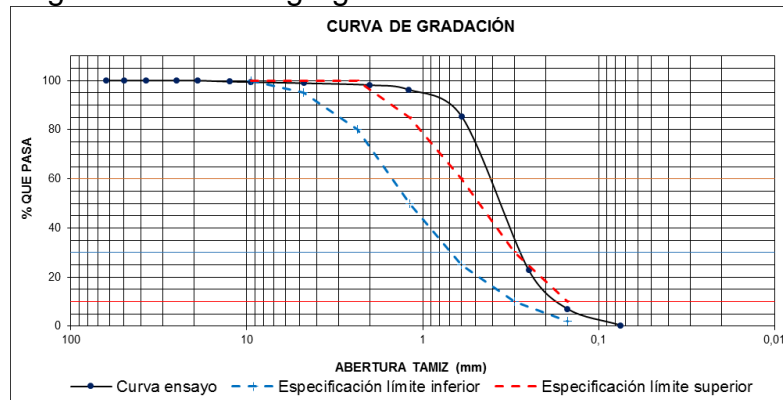
Cuadro 2. Resultados laboratorio de gradación del agregado fino

MUESTRA: AGREGADO FINO																														
TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA																										
				100,00																										
3"	0,00	0,00	0,00	100,00																										
2"	0,00	0,00	0,00	100,00																										
1 - 1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00																										
1"	0,00	0,00	0,00	100,00																										
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00																										
1/2"	6,70	0,42	0,42	99,58																										
3/8"	2,60	0,16	0,59	99,41																										
N 4	7,40	0,47	1,05	98,95																										
N 8	12,20	0,77	1,82	98,18																										
N 16	29,70	1,88	3,70	96,30																										
N 30	173,00	10,92	14,62	85,38																										
N 50	988,80	62,42	77,05	22,95																										
N 100	251,60	15,88	92,93	7,07																										
N 200	104,80	6,62	99,55	0,45																										
FONDO	7,20	0,45	100,00	0,00																										
TOTAL	1584,00																													
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Wrec + Wsec (g)</td> <td>1755,90</td> </tr> <tr> <td>Wrec (g)</td> <td>171,90</td> </tr> <tr> <td>Wsec (g)</td> <td>1584,00</td> </tr> <tr> <td>Error %</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <td>GRAVA (%)</td> <td>1,05</td> </tr> <tr> <td>ARENA (%)</td> <td>98,49</td> </tr> <tr> <td>FINOS (%)</td> <td>0,45</td> </tr> <tr> <td>D10</td> <td>0,17</td> </tr> <tr> <td>D30</td> <td>0,29</td> </tr> <tr> <td>D60</td> <td>0,46</td> </tr> <tr> <td>Cc</td> <td>1,09</td> </tr> <tr> <td>Cu</td> <td>2,72</td> </tr> <tr> <td>MÓDULO DE FINURA</td> <td>1,91</td> </tr> </table>					Wrec + Wsec (g)	1755,90	Wrec (g)	171,90	Wsec (g)	1584,00	Error %	0,00	GRAVA (%)	1,05	ARENA (%)	98,49	FINOS (%)	0,45	D10	0,17	D30	0,29	D60	0,46	Cc	1,09	Cu	2,72	MÓDULO DE FINURA	1,91
Wrec + Wsec (g)	1755,90																													
Wrec (g)	171,90																													
Wsec (g)	1584,00																													
Error %	0,00																													
GRAVA (%)	1,05																													
ARENA (%)	98,49																													
FINOS (%)	0,45																													
D10	0,17																													
D30	0,29																													
D60	0,46																													
Cc	1,09																													
Cu	2,72																													
MÓDULO DE FINURA	1,91																													

Fuente: Elaboración propia, 2018.

En la Figura 2, se muestra la curva granulométrica obtenida para la arena y se observa que la gradación no está dentro de las curvas de la especificación para este tipo de material, adicionalmente el módulo de finura de la arena está por debajo del rango recomendado para el agregado fino, el cual corresponde entre 2,3 - 3,1.

Figura 2. Curva granulométrica agregado fino



Fuente: Elaboración propia, 2018.

- **Humedad natural:** Norma INV E-122-13 “Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo – agregado”

En el Cuadro 3 se muestran los contenidos de humedad en porcentaje de la grava y de la arena.

Cuadro 3. Resultados laboratorio de contenido de humedad de los agregados

HUMEDADES (%)		
Muestra	Grava	Arena
Recipiente N°.	68	2c
Wrec + Whum (g)	2915,30	1944,30
Wrec + Wsec (g)	2908,70	1848,60
Wrec (g)	206,80	171,90
Wagua (g)	6,60	95,70
Wsec (g)	2701,90	1676,70
<b><math>\omega</math> (%)</b>	<b>0,2</b>	<b>5,7</b>

Fuente: Elaboración propia, 2018.



- **Peso específico, masa unitaria suelta y apisonada:** Norma INV E–217-13 “Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto”

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de laboratorio de la masa unitaria suelta y apisonada de la grava. Para el ensayo de masa unitaria, se utilizó un molde de diámetro 24,90cm y altura 19,64cm.

Cuadro 4. Resultados laboratorio de masa unitaria del agregado grueso

<b>MASA UNITARIA</b>	<b>SUELTA</b>	<b>APISONADA</b>
Peso molde (g)	3867,00	3867,00
Peso molde + grava (1) (g)	16210,00	17660,00
Peso molde + grava (2) (g)	16035,00	17862,00
Peso molde + grava (3) (g)	16050,00	17710,00
Peso molde + grava promedio (g)	16098,30	17744,00
Masa de la grava seca, (g)	12231,30	13877,00
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	9563,80	9563,80
Masa unitaria seca (Kg/m <sup>3</sup> )	1279,00	1451,00
Promedio masa unitaria suelta y apisonada (Kg/m <sup>3</sup> )	1365,00	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el Cuadro 5 se muestran los resultados de laboratorio de la masa unitaria suelta y apisonada de la arena. Para el ensayo de masa unitaria, se utilizó un molde de diámetro 15,96 cm y altura 15,60cm.

Cuadro 5. Resultados laboratorio de masa unitaria del agregado fino

<b>MASA UNITARIA</b>	<b>SUELTA</b>	<b>APISONADA</b>
Peso molde (g)	5140,00	5140,00
Peso molde + arena (1) (g)	9602,00	10169,00
Peso molde + arena (2) (g)	9609,00	10220,00
Peso molde + arena (3) (g)	9582,00	10220,00
Peso molde + arena promedio (g)	9597,70	10203,00
Masa de la arena seca, (g)	4457,70	5063,00
Volumen del molde (cm <sup>3</sup> )	3120,90	3120,90
Masa unitaria seca (Kg/m <sup>3</sup> )	1428,00	1622,00
Promedio masa unitaria suelta y apisonada (Kg/m <sup>3</sup> )	1525,00	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- **Absorción agregado grueso:** Norma INV E-223-13 “Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso”

En el Cuadro 6 se presenta los resultados de densidad y absorción obtenidas en laboratorio para la grava.

Cuadro 6. Resultados laboratorio de densidad y absorción del agregado grueso

<b>DENSIDAD Y ABSORCIÓN</b>	<b>ENSAYO</b>
Peso canastilla en el aire (g)	1370,00
Peso canastilla + grava SSS en el aire (g)	6370,00
Peso canastilla + grava en el agua (g)	4331,00
Peso canastilla en agua (g)	1204,00
Peso canastilla + grava seca (g)	6339,00
Masa de la muestra seca, M (g)	4969,00
Masa en el agua muestra saturada, Ma (g)	3127,00
Masa en el aire muestra saturada, Ms (g)	5000,00
Densidad aparente, Da (g/cm <sup>3</sup> )	2,65
Densidad nominal, Dn (g/cm <sup>3</sup> )	2,70
Absorción (%)	0,62

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- **Absorción agregado fino:** Norma INV E-222-13 “Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino”

En el Cuadro 7 se presenta los resultados de densidad y absorción obtenidas en laboratorio para la arena.

Cuadro 7. Resultados laboratorio de densidad y absorción del agregado fino

<b>DENSIDAD Y ABSORCIÓN</b>	<b>ENSAYO</b>
Masa de la probeta vacía (g)	1 48,90
Masa de la probeta con agua y con material (g)	2 826,60
Peso del recipiente (g)	202,20
Peso del recipiente + arena seca (g)	700,80
Masa arena seca (g)	3 498,60
Masa arena saturada y seca superficialmente (g)	4 500,00
Volumen de la probeta (cm <sup>3</sup> )	5 500,00
Densidad aparente, Da (g/cm <sup>3</sup> )	2,24
Densidad nominal, Dn (g/cm <sup>3</sup> )	2,26
Absorción (%)	0,28

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el Cuadro 8 se resumen las propiedades del agregado grueso, obtenidas de los ensayos de laboratorio realizados a la grava utilizada en el diseño de mezcla del concreto.

Cuadro 8. Propiedades del agregado grueso

Clasificación USCS	GP
Tamaño máximo	3,81 cm
Tamaño nominal máximo	2,54 cm
Densidad aparente	2,65 g/cm <sup>3</sup>
Densidad nominal	2,70 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	0,62%
Masa unitaria suelta	1,279 Kg/m <sup>3</sup>
Masa unitaria apisonada	1,451 Kg/m <sup>3</sup>
Textura	Rugosa con caras fracturadas
% que pasa tamiz 200 (contaminación)	0,02%
Humedad natural del agregado	0,20%

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el Cuadro 9 se resumen las propiedades del agregado fino, obtenidas de los ensayos de laboratorio realizados a la arena utilizada en el diseño de mezcla del concreto.

Cuadro 9. Propiedades del agregado fino

Clasificación USCS	SP-SM
Módulo de finura	1,91
Densidad aparente	2,24 g/cm <sup>3</sup>
Densidad nominal	2,26 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	0,28%
Masa unitaria suelta	1,428 Kg/m <sup>3</sup>
Masa unitaria apisonada	1,622 Kg/m <sup>3</sup>
% que pasa tamiz 200 (contaminación)	0,45%
Humedad natural del agregado	5,70%

Fuente: Elaboración propia, 2017.

- **Contenido de materia orgánica:** Norma INV E-212-13 “Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos”

El ensayo se realiza con un volumen de 130,00ml de muestra y se realiza la comparación de colores de la muestra de ensayo y el uso de vidrios de colores de referencia. El resultado del ensayo determina que la muestra de arena no presenta impurezas orgánicas nocivas y por lo tanto, se puede utilizar en la producción de las mezclas de concreto.




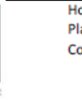

- **Cemento:** el cemento para el diseño de la mezcla es hidráulico “Cemento portland tipo I”, cumpliendo el artículo INV 501-13 “Suministro de cemento hidráulico” de la norma INVIAS 2013 y la norma ASTM 150 “Especificación estándar para cemento portland”.

Para la caracterización del cemento se realizan los siguientes ensayos:

- **Peso específico del cemento:** Norma INV E-307-13 “Densidad del cemento hidráulico”
- **Finura del cemento:** Norma NTC 33 “Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire”.

El cemento utilizado en el diseño de mezcla es Holcim de 50kg de uso general. Los resultados de los ensayos de caracterización de laboratorio para el cemento utilizado, se corroboran mediante el certificado de calidad mostrado en la figura 3 suministrado por Holcim Colombia S.A, donde se observa que el cemento utilizado cumple con los requerimientos establecidos en las especificaciones.

Figura 3. Certificado de calidad del cemento

								Holcim (Colombia) S.A. Planta Nobsa Control de Calidad		Km 15 vía Duitama - Belencito Nobsa, Boyacá Telefono +57 8 7730555																																																																																															
<b>Certificado de Producto</b>								Doc ID:	H00-CC02-197																																																																																																
								Revision:	2																																																																																																
Autor: Ingeniero de Control de Calidad				Revisa: Coordinador de Control de Calidad				Aprueba: Coordinador de Control de Calidad																																																																																																	
Producto: <b>Cemento Fuerte Tipo UG</b>								Resultados de las muestras de: 06/07/2015 a: 12/07/2015																																																																																																	
<b>Certificacion</b>																																																																																																									
El cemento Fuerte tipo UG cumple con las especificaciones de la NTC 121 para cemento tipo UG para uso general Los métodos de ensayo empleados corresponden a los establecidos en el numeral 7.2 de la norma NTC 121, bajo el Programa de seguimiento y medicion de producto y la ficha técnica de frecuencia y análisis de muestras.																																																																																																									
<b>Informacion General</b>																																																																																																									
<b>METODOS DE ENSAYO EMPLEADOS</b>																																																																																																									
Proveedor: Holcim Colombia S.A. Planta: Nobsa Direccion: Km 15 vía Duitama - Belencito Municipio: Nobsa, Boyacá, Colombia Telefono: 57-8-7730555 Cliente: Todos				NTC 33: Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine NTC 221: Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. NTC 294: Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico utilizando tamiz 45µm NTC 107: Método de ensayo para determinar la expansión en autoclave del cemento portland NTC 118: Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de Vicat NTC 224: Método para determinar el contenido de mortero de cemento hidráulico. NTC 220: Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico NTC 4927: Método de ensayo para medir la expansión del cemento en barras de mortero sumergidas en agua NTC 184: Métodos de análisis químico de los cementos hidráulicos. NTC 110: Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico NTC5784: Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico.																																																																																																					
La información presentada a continuación corresponde al promedio de los datos disponibles obtenidos para el periodo de análisis indicado. La ejecución de los ensayos se lleva a cabo dentro de la semana posterior al periodo especificado de análisis. Los datos son del cemento despachado por Holcim Colombia S.A. Planta Nobsa, correspondiente a ese tipo. Los despachos individuales pueden variar.																																																																																																									
<b>Informe de Resultados</b>																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Composición química</th> </tr> <tr> <th>Oxido</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>SiO2 (%)</td><td>40.7</td></tr> <tr><td>Al2O3 (%)</td><td>7.0</td></tr> <tr><td>Fe2O3 (%)</td><td>2.66</td></tr> <tr><td>CaO (%)</td><td>40.3</td></tr> <tr><td>MgO (%)</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>SO3 (%)</td><td>3.50</td></tr> <tr><td>P.I. (%)</td><td>3.8</td></tr> <tr><td>Na2O (%)</td><td>0.10</td></tr> <tr><td>K2O (%)</td><td>0.84</td></tr> <tr><td>TiO2 (%)</td><td>0.33</td></tr> <tr><td>P2O5 (%)</td><td>0.26</td></tr> <tr><td>Cl (%)</td><td>0.010</td></tr> <tr><td>Suma</td><td>100.2</td></tr> </tbody> </table>						Composición química		Oxido	%	SiO2 (%)	40.7	Al2O3 (%)	7.0	Fe2O3 (%)	2.66	CaO (%)	40.3	MgO (%)	0.7	SO3 (%)	3.50	P.I. (%)	3.8	Na2O (%)	0.10	K2O (%)	0.84	TiO2 (%)	0.33	P2O5 (%)	0.26	Cl (%)	0.010	Suma	100.2	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Ensayos Fisicos</th> </tr> <tr> <th>Ensayo</th> <th>Unidad</th> <th>Resultado</th> <th>Especificación NTC 121, 2014</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Blaine</td><td>m2/kg</td><td>520</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Densidad</td><td>g/cm3</td><td>2.75</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Finura 45 µm</td><td>%</td><td>14.2</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Fraguado inicial - Vicat</td><td>minutos</td><td>155</td><td>45 - 420</td></tr> <tr><td>Fraguado final - Vicat</td><td>minutos</td><td>255</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Consistencia Normal</td><td>%</td><td>28.5</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Resistencia 1 día</td><td>Mpa</td><td>5.2</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Resistencia 3 días</td><td>Mpa</td><td>12.2</td><td>≥ 8</td></tr> <tr><td>Resistencia 7 días</td><td>Mpa</td><td>19.3</td><td>≥ 15</td></tr> <tr><td>Resistencia 28 días</td><td>Mpa</td><td>33.0</td><td>≥ 24</td></tr> <tr><td>A/C</td><td>--</td><td>54.60</td><td>N.A.</td></tr> <tr><td>Contenido de aire</td><td>%</td><td>3.0</td><td>≤ 12</td></tr> <tr><td>Expansión Autoclave</td><td>%</td><td>0.02</td><td>≤ 0.80</td></tr> <tr><td>Expansión barras mortero</td><td>%</td><td>-0.010</td><td>≤ 0.020</td></tr> </tbody> </table>						Ensayos Fisicos				Ensayo	Unidad	Resultado	Especificación NTC 121, 2014	Blaine	m2/kg	520	N.A.	Densidad	g/cm3	2.75	N.A.	Finura 45 µm	%	14.2	N.A.	Fraguado inicial - Vicat	minutos	155	45 - 420	Fraguado final - Vicat	minutos	255	N.A.	Consistencia Normal	%	28.5	N.A.	Resistencia 1 día	Mpa	5.2	N.A.	Resistencia 3 días	Mpa	12.2	≥ 8	Resistencia 7 días	Mpa	19.3	≥ 15	Resistencia 28 días	Mpa	33.0	≥ 24	A/C	--	54.60	N.A.	Contenido de aire	%	3.0	≤ 12	Expansión Autoclave	%	0.02	≤ 0.80	Expansión barras mortero	%	-0.010	≤ 0.020
Composición química																																																																																																									
Oxido	%																																																																																																								
SiO2 (%)	40.7																																																																																																								
Al2O3 (%)	7.0																																																																																																								
Fe2O3 (%)	2.66																																																																																																								
CaO (%)	40.3																																																																																																								
MgO (%)	0.7																																																																																																								
SO3 (%)	3.50																																																																																																								
P.I. (%)	3.8																																																																																																								
Na2O (%)	0.10																																																																																																								
K2O (%)	0.84																																																																																																								
TiO2 (%)	0.33																																																																																																								
P2O5 (%)	0.26																																																																																																								
Cl (%)	0.010																																																																																																								
Suma	100.2																																																																																																								
Ensayos Fisicos																																																																																																									
Ensayo	Unidad	Resultado	Especificación NTC 121, 2014																																																																																																						
Blaine	m2/kg	520	N.A.																																																																																																						
Densidad	g/cm3	2.75	N.A.																																																																																																						
Finura 45 µm	%	14.2	N.A.																																																																																																						
Fraguado inicial - Vicat	minutos	155	45 - 420																																																																																																						
Fraguado final - Vicat	minutos	255	N.A.																																																																																																						
Consistencia Normal	%	28.5	N.A.																																																																																																						
Resistencia 1 día	Mpa	5.2	N.A.																																																																																																						
Resistencia 3 días	Mpa	12.2	≥ 8																																																																																																						
Resistencia 7 días	Mpa	19.3	≥ 15																																																																																																						
Resistencia 28 días	Mpa	33.0	≥ 24																																																																																																						
A/C	--	54.60	N.A.																																																																																																						
Contenido de aire	%	3.0	≤ 12																																																																																																						
Expansión Autoclave	%	0.02	≤ 0.80																																																																																																						
Expansión barras mortero	%	-0.010	≤ 0.020																																																																																																						
<b>Comentarios</b>																																																																																																									
Los resultados de los analisis quimicos estan calculados en porcentaje en peso. Los resultados de expansión al autoclave, barras sumergidas en agua y contenido de aire se evalúan mensualmente. N/A: No aplica N/D: Resultado del ensayo para este periodo de produccion no disponible																																																																																																									
 Nadia C. Pérez M. Coordinadora de Control de Calidad Holcim Colombia S.A., Planta Nobsa								Fecha de reporte:		8 de agosto de 2015																																																																																															

Fuente: INGENIERO CONTROL DE CALIDAD. Certificado de producto: Cemento fuerte tipo UG. Planta Nobsa: Holcim Colombia S.A.

- Agua: El agua utilizada para la mezcla deberá cumplir la norma INV E-417–13 “Calidad del agua para concretos”

El agua utilizada para la fabricación de los especímenes de concreto es la utilizada para consumo humano, por lo tanto, no se realizan ensayos de calidad de agua, ya que esta no presenta sustancias nocivas que puedan afectar la mezcla de concreto tanto en estado plástico como endurecido.

**Cumplimiento agregados grueso y fino:** En los cuadros 10 y 11 se presentan los demás requisitos que deben cumplir los agregados grueso y fino para la elaboración de concretos utilizados en la construcción de pavimentos rígidos y el chequeo del cumplimiento de los agregados utilizados en la presente investigación.

Cuadro 10. Requisitos del agregado fino para pavimentos de concreto hidráulico

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito	Observación
<b>Durabilidad (O)</b>			
Pérdida en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)			
Sulfato de sodio	E - 220	10,00	Cumple
Sulfato de magnesio		15,00	Cumple
<b>Limpieza (F)</b>			
Índice de plasticidad (%)	E - 125 y E - 126	NP	Cumple
Equivalente de arena, mínimo (%)	E - 133	60,00	Cumple
Terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E - 211	3,00	Cumple
Partículas livianas, máximo (%)	E - 221	0,50	Cumple
Material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200), máximo (%)	E - 14	3,00	Cumple
<b>Contenido de materia orgánica (F)</b>			
Color más oscuro permisible	E - 212	Igual a muestra patrón	Cumple
<b>Características químicas (O)</b>			
Contenido de sulfatos, expresado como $SO_4^{=}$ , máximo (%)	E - 233	1,20	Cumple
<b>Absorción (O)</b>			
Absorción de agua, máximo (%)	E - 222	4,00	Cumple

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Cuadro 11. Requisitos del agregado grueso para pavimentos de concreto hidráulico

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito	Observación
<b>Dureza (O)</b>			
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%)	E - 218	40,00	Cumple
500 revoluciones		8,00	Cumple
100 revoluciones			
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E - 238	30,00	Cumple
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos	E - 224	90,00	Cumple
Valor en seco, mínimo (KN)		75,00	Cumple
Relación húmedo/seco, mínimo (%)			
<b>Durabilidad (O)</b>			
Pérdida en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E - 220	10,00	Cumple
Sulfato de sodio		15,00	Cumple
Sulfato de magnesio			
<b>Limpieza (F)</b>			
Terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E - 211	3,00	Cumple
Partículas livianas, máximo (%)	E - 221	0,50	Cumple
<b>Geometría de las partículas (F)</b>			
Partículas fracturadas mecánicamente (una cara), mínimo (%)	E - 227	60,00	Cumple
Partículas planas y alargadas (relación 5:1), máximo (%)	E - 240	10,00	Cumple
<b>Características químicas (O)</b>			
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como $SO_4^{=}$ máximo (%)	E - 233	1,00	Cumple
Reactividad álcali - agregado grueso y fino: Concentración $SiO_2$ y reducción de alcalinidad R	E - 234	$SiO_2 \leq R$ cuando $R \geq 70$ $SiO_2 \leq 35 + 0,35R$ cuando $R < 70$	Cumple

Fuente: Elaboración propia, 2017.

## ANEXO B. DISEÑO DE MEZCLA DE MUESTRA PATRÓN

Teniendo en cuenta que los agregados no cumplen con precisión las granulometrías establecidas en el Artículo 500 “Pavimento de concreto hidráulico” de la norma INVIAS 2013, el diseño de mezcla se realizó a partir del método gráfico propuesto por Fuller y Thompson, ajustado por Bolomey. A continuación se presenta la metodología utilizada para la obtención del diseño de mezcla.

### • SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

La selección del asentamiento se realiza de la misma manera que el método de diseño de mezclas de concreto propuesto por la ACI 211 (Véase el cuadro 1). Para pavimentos rígidos con sistema de colocación manual y compactado sin vibración, se recomienda un asentamiento de 7,50cm con el fin de obtener un concreto de consistencia media.

Cuadro 1. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción

ASENTAMIENTO (cm)	CONSISTENCIA (TIPO DE CONCRETO)	GRADO DE TRABAJABILIDAD	TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIONES DE COLOCACIÓN
0 - 2,0	MUY SECA	MUY PEQUEÑO	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaletas
2,0 - 3,5	SECA	PEQUEÑO	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3,5 - 5,0	SEMI-SECA	PEQUEÑO	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5,0 - 10,0	MEDIA	MEDIO	Losas medianamente reforzadas y pavimentos compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración
10,0 - 15,0	HUMEDA	ALTO	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración.

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Colección del concreto - Tecnología del concreto – Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tabla 11.1. 3 ed. Bogotá D.C.: ASOCRETO, 2010, p187.

### • SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO

Se realiza de la misma manera que el método ACI 211. En el cuadro 2, se presenta el tamaño máximo nominal del agregado recomendado según el tipo de



estructura. De acuerdo a los ensayos de laboratorio, se tiene que el tamaño máximo del agregado utilizado en el diseño de mezcla es de 3,81cm, por lo tanto, el tamaño cumple con las recomendaciones estipuladas en la tabla mostrada para estructuras conformadas por pavimentos rígidos.

Cuadro 2. Valores recomendados de TMN según el tipo de construcción

DIMENSIÓN MÍNIMA DEL ELEMENTO (cm)	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL EN mm (pulgadas)			
	MUROS REFORZADOS, VIGAS Y COLUMNAS	MUROS SIN REFUERZO	LOSAS MUJY REFORZADAS	LOSAS SIN REFUERZO O POCO REFORZADAS
6 - 15	12(1/2") - 19(3/4")	19(3/4")	19(3/4") - 25(1")	19(3/4") - 38(1 1/2")
19 - 29	19(3/4") - 38(1 1/2")	38(1 1/2")	38(1 1/2") - 76(3")	
30 - 74	38(1 1/2") - 76(3")	76(3")	38(1 1/2") - 76(3")	76(3")
75 o más	38(1 1/2") - 76(3")	152(6")	38(1 1/2") - 76(3")	76(3") - 152(6")

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Colección del concreto - Tecnología del concreto – Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tabla 11.2. 3 ed. Bogotá D.C.: ASOCRETO, 2010, p188.

- ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

Se realiza de la misma manera que el método ACI 211, en el cuadro 3 se presenta la cantidad de aire en el concreto recomendado por la ACI 318 S-08 para diferentes grados de exposición, de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado grueso (2,54cm) el contenido de aire atrapado es del 1,50% del volumen de concreto, sin embargo, teniendo en cuenta que el concreto no va estar expuesto a condiciones severas, se recomienda producir la mezcla sin aire incluido, y sin aire atrapado ya que el método de Fuller y Thompson no considera este último en el diseño de la mezcla.

Cuadro 3. Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición

AGREGADO GRUESO		PORCENTAJE PROMEDIO APROXIMADO DE AIRE ATRAPADO	PORCENTAJE PROMEDIO TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA LOS SIGUIENTES GRADOS DE EXPOSICIÓN		
Pulgadas	mm		SUAVE	MEDIANO	SEVERO
3/8	9,51	3,0	4,5	6,0	7,5
1/2	12,50	2,5	4,0	5,5	7,0
3/4	19,10	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25,40	1,5	3,0	4,5	6,0
1 1/2	38,10	1,0	2,5	4,5	5,5
2	50,80	0,5	2,0	4,0	5,0
3	76,10	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,40	0,2	1,0	3,0	4,0

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Colección del concreto - Tecnología del concreto – Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tabla 11.3. 3 ed. Bogotá D.C.: ASOCRETO, 2010, p189.

- CALCULO DE AGUA DE MEZCLA

Con base a la forma, tamaño y textura del agregado grueso, en el cuadro 4 se presentan los valores recomendados de cantidad de agua en Kg/m<sup>3</sup> para la mezcla de concreto teniendo en cuenta el asentamiento escogido y la cantidad de aire incluido. El diseño de mezcla se realiza con agregados secos y se tiene en cuenta la absorción de los materiales, por lo tanto la cantidad de agua de mezclado es de 249Kg/m<sup>3</sup>.

Cuadro 4. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado.

Condición del contenido de aire	ASENTAMIENTO (cm)	Agua en Kg/m <sup>3</sup> de concreto para los TMN del agregado indicado							
		10	12,5	20	25	40	50 **	70 **	150 **
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	---
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, por ciento	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	---
	Promedio recomendable de contenido total de aire por ciento	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

\* Estas cantidades de agua de mezclado deben utilizarse en los cálculos de los factores de cemento para mezclas de prueba. Son las máximas para agregados gruesos angulares razonablemente bien formados graduados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.

\*\* Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40mm están basados en pruebas de asentamiento efectuado después de remover las partículas mayores de 40mm por medio de cribado húmedo.

Fuente: NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Colección del concreto - Tecnología del concreto – Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas. Tabla 11.4. 3 ed. Bogotá D.C.: ASOCRETO, 2010, p191.

- DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

La resistencia de diseño de la mezcla de concreto se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$f'_{cr} = f'_{c} + 35$$

Donde:

f'c'r: Resistencia crítica de diseño

f'c: Resistencia nominal de diseño

La anterior expresión se utiliza teniendo en cuenta que no se tienen datos estadísticos de muestras de concreto de similar condición en cuanto a los agregados. Por lo tanto, la resistencia de diseño es

$$f'_{cr} = (295 + 35) \frac{Kg}{cm^2} = 330 \frac{Kg}{cm^2}$$

- SELECCIÓN DE LA RELACIÓN A/C

Del cuadro 5 y a partir de la resistencia de diseño de la mezcla de concreto a compresión a los 28 días de edad y de la condición sin inclusión de aire, se obtiene la relación agua/cemento, la cual es A/C=0.524

Cuadro 5. Dependencia entre la relación agua-material cementante y la resistencia a compresión del concreto

Resistencia a compresión a los 28 días, Kg/cm <sup>2</sup> (Mpa)	Relación agua - material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0,38 (0,38)	0,31 (0,30)
400 (40)	0,43 (0,42)	0,34 (0,34)
350 (35)	0,48 (0,47)	0,40 (0,39)
300 (30)	0,55 (0,54)	0,46 (0,45)
250 (25)	0,62 (0,61)	0,53 (0,52)
200 (20)	0,70 (0,69)	0,61 (0,60)
150 (15)	0,80 (0,79)	0,72 (0,70)

KERKHOFF, Beatrix, KOSMATKA, Steven H., TANESI, Jussara y PANARESE, William C. Diseño y control de mezclas de concreto. Table 9-3. Skokie, Illinois, EE.UU.: PCA, 2004, p187.

- CALCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO

El contenido de cemento de la mezcla de concreto por metro cúbico es el siguiente:

$$C = \frac{A}{A/C} = \frac{249Kg/m^3}{0,524} = 475,19Kg/m^3$$

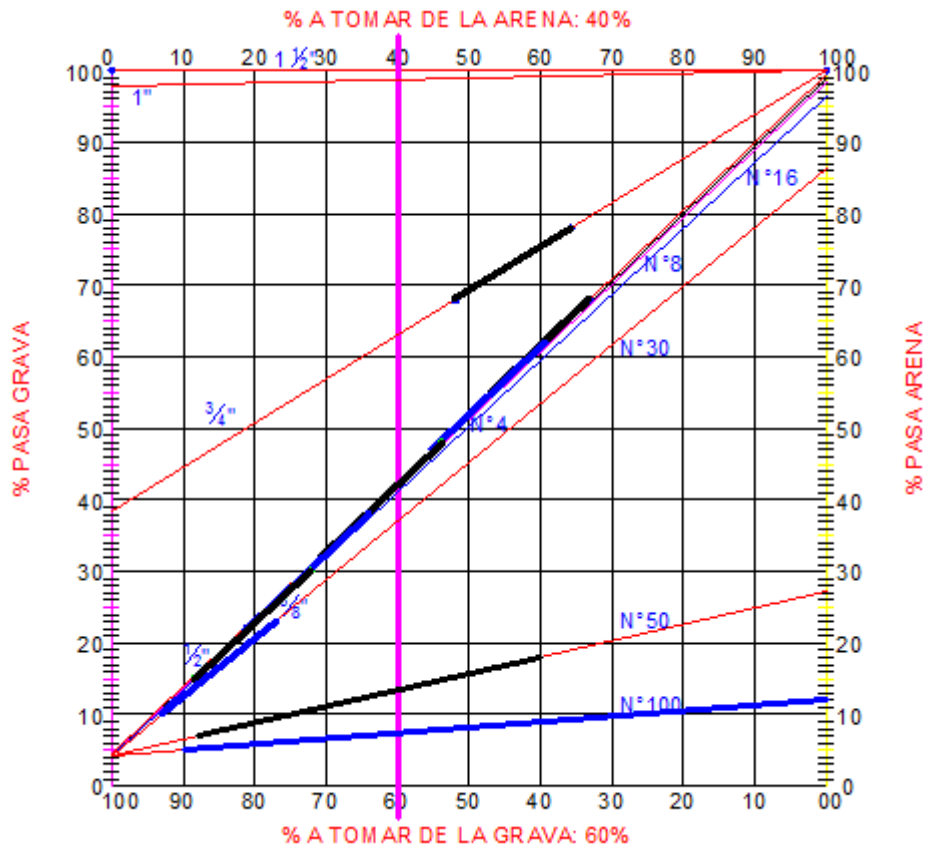
El volumen que ocupa la masa de cemento es:

$$V_c = \frac{m_c}{\rho_c} = \frac{475,19Kg/m^3}{3100,00Kg/m^3} = 0,153 \frac{m^3}{m^3}$$

- ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO Y FINO

Teniendo en cuenta que los agregados grueso y fino presentan una gradación mal gradada y se alejan de las curvas granulométricas requeridas en las especificaciones de construcción, se calcula la proporción óptima de cada uno de los agregados por el método gráfico mostrado en la Figura 1.

Figura 1. Granulometría combinada de materiales - método gráfico



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Con base a la Figura 1, se obtiene que la mezcla óptima está compuesta por 40% de agregado fino y 60% de agregado grueso. El volumen total de los agregados por metro cúbico de concreto está definido por la siguiente ecuación:

$$V_{\text{agreg}} = 1,00 - (V_c + V_a - V_{\text{ar}} + A)$$

Donde:

$V_{\text{agreg}}$ : Volumen total de agregados grueso y fino,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

$V_c$ : Volumen total de cemento,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

$V_a$ : Volumen total de agua,  $\text{m}^3/\text{m}^3$

Var: Volumen total de agua por rendimiento,  $m^3/m^3$

A: Volumen total del contenido de aire,  $m^3/m^3$

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$V_{agreg} = 1,00 - (0,153 - 0,249 - 0,040 + 0,000) = 0,638m^3/m^3$$

Con el fin de determinar los pesos secos de los agregados se calcula la densidad aparente promedio de los agregados, mediante la siguiente expresión:

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_{grava} * \rho_{arena}}{\%arena * \rho_{grava} + \%grava * \rho_{arena}}$$

Donde:

$\rho_{grava}$ : Densidad aparente de la grava,  $Kg/m^3$

$\rho_{arena}$ : Densidad aparente de la arena,  $Kg/m^3$

$\rho_{prom}$ : Densidad aparente promedio de los agregados,  $Kg/m^3$

$\%grava$ : Porcentaje de la grava, en forma decimal

$\%arena$ : Porcentaje de la arena, en forma decimal

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$\rho_{prom} = \frac{2650 \frac{Kg}{m^3} * 2240 \frac{Kg}{m^3}}{0,40 * 2650 \frac{Kg}{m^3} + 0,60 * 2240 \frac{Kg}{m^3}} = 2469,22 \frac{Kg}{m^3}$$

Los pesos secos de los agregados se determinan de la siguiente manera:

$$W_{agreg} = \rho_{prom} * V_{agreg} * \%agreg$$

Donde:

$W_{agreg}$ : Peso seco de los agregados,  $Kg/m^3$

$\%agregado$ : Porcentaje de dosificación del agregado, en forma decimal

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$W_{grava} = 2469,22 \frac{Kg}{m^3} * 0,638 \frac{m^3}{m^3} * 0,60 = 945,21 \frac{Kg}{m^3}$$

$$W_{arena} = 2469,22 \frac{Kg}{m^3} * 0,638 \frac{m^3}{m^3} * 0,40 = 630,14 \frac{Kg}{m^3}$$

- PROPORCIÓN POR PESO SECO

Con el fin de facilitar las dosificaciones de los materiales por peso a la hora de realizar las mezclas de concreto, se redondea los valores obtenidos de los materiales a la unidad. La dosificación por peso seco de los materiales por metro cúbico de concreto es la mostrada en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Dosificación por peso seco por metro cúbico de concreto

Material	Peso Seco (Kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	475
Grava	945
Arena	630
Agua	249
Total	2300

Fuente: Elaboración propia, 2018.

La dosificación por bulto de cemento de 50kg es la mostrada en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Dosificación por bulto de cemento

Material	Peso Seco (Kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	50
Grava	100
Arena	66
Agua	26

Fuente: Elaboración propia, 2018.

- AJUSTE POR HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

El peso húmedo de los agregados grueso y fino se determina de la siguiente manera:

$$W_{hum} = W_{agreg} * (1 + \omega_{agreg})$$

Donde:

$W_{hum}$ : Peso húmedo de los agregados, Kg/m<sup>3</sup>

$\omega_{agreg}$ : Humedad natural del agregado, en tanto por uno

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$W_{hum\_grava} = 945,21 \frac{Kg}{m^3} * (1 + 0,002) = 947,10 \frac{Kg}{m^3}$$

$$W_{hum\_arena} = 630,14 \frac{Kg}{m^3} * (1 + 0,057) = 666,06 \frac{Kg}{m^3}$$

El agua en exceso se calcula de la siguiente manera:

$$A_{exc} = A_{grava} + A_{arena}$$

$$A_{agreg} = W_{hum\_agreg} * (\omega_{agreg} - Abs_{agreg})$$

Donde:

$A_{exc}$ : Agua en exceso total, Kg

$A_{grava}$ : Agua en exceso de la grava, Kg

$A_{arena}$ : Agua en exceso de la arena, Kg

$Abs_{agreg}$ : Absorción del agregado, en tanto por uno

Reemplazando los valores conocidos, se tiene:

$$A_{grava} = 945,21 \frac{Kg}{m^3} * (0,002 - 0,0062) = -3,97 \frac{Kg}{m^3}$$

$$A_{grava} = 630,14 \frac{Kg}{m^3} * (0,057 - 0,0028) = 34,15 \frac{Kg}{m^3}$$

$$A_{exc} = -3,97Kg + 34,15Kg = 30,18 \frac{Kg}{m^3}$$

El agua real de mezcla del concreto es  $249Kg/m^3 - 30,18Kg/m^3 = 218,82 Kg/m^3$ . La cantidad de agua real de mezcla puede variar de acuerdo a la humedad de los agregados al momento de realizar las mezclas de concreto.

- PROPORCIÓN POR PESO HÚMEDO

Los valores obtenidos de los materiales para la dosificación de la mezcla de concreto se redondean a la unidad. La dosificación por peso húmedo de los materiales por metro cúbico de concreto es la mostrada en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Dosificación por peso húmedo por metro cúbico de concreto

Material	Peso húmedo (Kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	475
Grava	947
Arena	666
Agua	219
Total	2307

Fuente: Elaboración propia, 2018.

La dosificación por bulto de cemento de 50kg es la mostrada en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Dosificación por bulto de cemento

Material	Peso húmedo (Kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	50
Grava	100
Arena	70
Agua	23

Fuente: Elaboración propia, 2018.



## ANEXO C. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS FIBRAS SINTÉTICAS

Figura 1. Especificaciones macrofibra Toc Fibra 500



EUCLID CHEMICAL  
TOXEMENT

Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co  
www.toxement.com.co

### TOC FIBRA 500

**Fibra de refuerzo secundario para concreto o mortero**

**TX40T106**

**DESCRIPCION**

**TOC FIBRA 500** es un refuerzo secundario de polipropileno fibrilado, para concreto o mortero.

**INFORMACION TECNICA**

**CARACTERISTICAS FISICO QUIMICAS**  
Material 100% polipropileno virgen  
Gravedad específica : 0.91 G/m<sup>3</sup> (ASTM D-1505)  
Indice de fluidez : 0.3 g/seg (ASTM D-1238)  
Punto de fusión : 166°C (300°F)  
Punto de ignición : 590°C (1.100°F)  
Absorción de agua a 20°C: Ninguna  
Corte de fibra : ¼, 1, 1½, 2½ pulgadas

Resistencia química a bases y agentes oxidantes : Inerte\*  
Resistencia química a los ácidos y álcalis : Inerte\*  
Resistencia al moho y Microorganismos : Buena\*  
\* En conformidad con la norma ASTM C-1116

**CARACTERISTICAS MECANICAS**  
Módulo de elasticidad : 0.7 x 10<sup>6</sup> psi.  
Resistencia a la tensión : 80 K.S.I.  
Resistencia a la tracción : 70.000 psi.  
Elongación hasta el rompimiento : 8% mínimo  
Resistencia a la abrasión : Buena  
Conductividad térmica y Eléctrica : Baja

**USOS**

Se utiliza como refuerzo secundario, en placas de concreto o morteros de recubrimiento, otorgando resistencia al movimiento por contracción térmica y de secado; al mezclarse al concreto o mortero en estado fresco, reduce la formación de grietas por retracción plástica. En caso de ocasionarse grietas en estado endurecido por fallas de estructura menores, minimiza el ancho de longitud de las mismas.

**VENTAJAS**

- El refuerzo se realiza de forma multidireccional.
- Mejora las resistencias mecánicas.
- Reduce grietas en estado plástico y endurecido.
- Reduce la permeabilidad.
- Aumenta la durabilidad.

- Es compatible con cualquier tratamiento de superficie.
- Puede ser adicionado en las plantas mezcladoras de concreto o directamente en el sitio de trabajo.
- Reduce la segregación.
- No es necesario realizar cambios en el diseño de la mezcla.

**RENDIMIENTO**

**TOC FIBRA 500** se dosifica en cantidad de 1 kg/m<sup>3</sup> de concreto o mortero preparado.

**APLICACION**

**TOC FIBRA 500** se adiciona a la mezcla de concreto, junto con los agregados cuando se produce en planta de mezclado o directamente al concreto húmedo. En el primer caso basta con el tiempo de mezcla acostumbrado de la preparación del concreto; si se adiciona al concreto húmedo, es necesario mezclar entre 3 y 5 minutos adicionales.

**RECOMENDACIONES ESPECIALES**

- Utilice solamente la dosificación recomendada para evitar apelmazamientos.
- El asentamiento de la mezcla puede verse disminuido con la utilización de la fibra.
- **TOC FIBRA 500** no reemplaza el acero de refuerzo primario o refuerzo estructural.
- Deben tenerse en cuenta los tiempos de mezcla para optimizar la incorporación de la fibra en el concreto o mortero.
- De acuerdo al tamaño del agregado se recomienda un tamaño de fibra:

TAMAÑO DE AGREGADO EN PULGADAS	TAMAÑO DE LA FIBRA EN PULGADAS
Hasta 1"	¼
Mayor a 1"	1 ½

**MANEJO Y ALMACENAMIENTO**

**TOC FIBRA 500** debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado y bajo techo.

Vida útil en almacenamiento: 1 año.

Figura 2. Especificaciones macrofibra Tuf Strand SF



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
 PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
 E-mail: atencioncliente@toxement.com.co  
 www.toxement.com.co

<h2 style="margin: 0;">TUF STRAND SF</h2> <p style="margin: 5px 0;"><b>Fibras sintéticas estructurales</b></p> <p style="text-align: right; margin: 0;"><b>TX40T231</b></p>
---

**DESCRIPCION**

**TUF - STRAND SF** son fibras sintéticas estructurales 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 una amplia variedad de aplicaciones.

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.

El concreto reforzado con **TUF - STRAND SF** tiene un reforzamiento tridimensional con incremento de la tenacidad a la flexión, la resistencia a la abrasión y al impacto. También ayuda a reducir la formación de fisuras por retracción plástica en el concreto.

Las macrofibras sintéticas cumplen con las partes aplicables del International Code Council (ICC), criterio de aceptación AC 308 para fibras sintéticas, tienen certificación UL para uso en construcción de sistemas metaldeck y son reconocidas por ACI 308 R-06 y SDI / ANSI.C.I.O como alternativas al reforzamiento con malla electrosoldada.

**INFORMACION TECNICA**

**PROPIEDADES FISICAS**

Material	: Mezcla de Polipropileno / polietileno
Gravedad Específica	: 0.92
Resistencia a Tensión	: 600 - 650 MPa (87 - 94 Ksi)
Módulo de elasticidad	: 9.5 GPa (1,388 Ksi)
Punto de llama (ASTM D-1929)	: 330°C (625°F)
Longitud de fibra	: 50 mm (2")
Aspect Ratio	: 74
Color	: Blanco
Absorción de agua	: Despreciable
Resistencia a álcalis	: Excelente
Resistencia a ácidos	: Excelente
Resistencia a moho – hongos	: Excelente
Dosis típica	: 1.8 - 12 kg/m <sup>3</sup>
Denier	: 3000

**USOS**

- Elementos prefabricados en concreto.
- Concreto lanzado (recubrimiento de túneles, construcción de piscinas, estabilización de taludes).
- Pavimentos y Whitetopping
- Pisos de concreto en centros de distribución, pisos industriales, pisos de bodegas.

**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.
- **TUF - STRAND SF** ha sido probada de acuerdo con ASTM C-1399, C-1550, C-1609 y C-1018 y EFNARC (Experts for Specialized Construction and Concrete Systems).
- Aplican los criterios de diseño considerados en ACI 308 R-06, capítulo 10.
- Certificación de uso UL / ULC para ensambles de metaldeck D900 series, como alternativa al uso de malla electrosoldada.
- 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.

**DOSIFICACION**

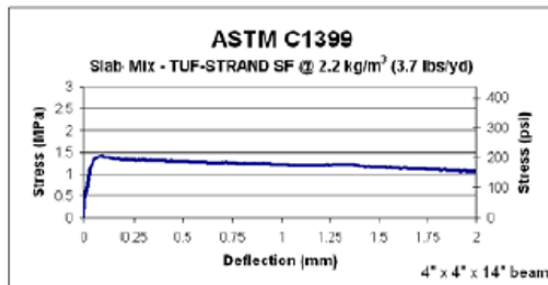
**TUF - STRAND SF** puede ser adicionado al concreto en un rango de 1.8 - 12 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de la aplicación y requerimientos del diseño de mezcla.

Para establecer la cantidad de **TUF - STRAND SF** necesaria para reemplazar la malla electrosoldada en una aplicación específica, consulte al Departamento Técnico de EUCLID - TOXEMENT.



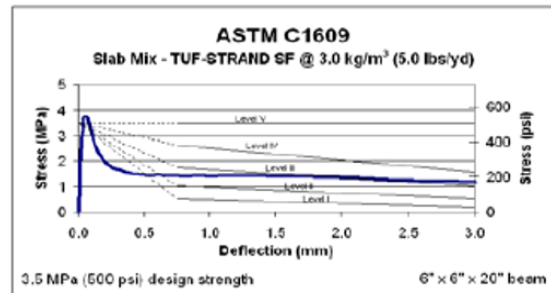
### APLICACION

- 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/m<sup>3</sup> se puede prever un asentamiento de 50 mm (2"). Para dosificaciones de 3 a 7 kg/m<sup>3</sup> 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 EUCLID – 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.



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

single test analysis - individual results may vary



P <sub>150,0.75</sub>	f <sub>150,0.75</sub>	P <sub>150,3.0</sub>	f <sub>150,3.0</sub>	T <sub>150,3.0</sub>	JSCE	R <sub>63</sub> (%)
10.5 kN	1.4 MPa	9.0 kN	1.2 MPa	35 J	1.41 MPa	34.8
2360 lbs	200 psi	2020 lbs	175 psi	310 in lb	205 psi	

single test analysis - individual results may vary

### PRECAUCIONES

- Es necesario hacer ensayos preliminares para determinar las dosis óptimas de aditivo y fibra a utilizar, en función de los requerimientos de colocación y uso del concreto.
- El uso de fibras puede causar una pérdida aparente del asentamiento del concreto, la cual se puede compensar con el uso de aditivos plastificantes / reductores de agua.
- Las fibras nunca se deben adicionar a concretos con asentamiento cero. Asegúrese que el concreto tenga un asentamiento mínimo de 80 mm (3") antes de adicionar la fibra.

### ALMACENAMIENTO

TUF - STRAND SF debe almacenarse en su empaque original, herméticamente cerrado y en lugares secos.

Vida útil de almacenamiento: 3 años en su empaque original, sin abrir.

### PRESENTACION

Bolsa 2,27 kg  
 Granel

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web [www.toxement.com.co](http://www.toxement.com.co) para consultar la última versión.

Figura 3. Especificaciones microfibra Fiber Strand N



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4  
 PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.  
 E-mail: atencioncliente@toxement.com.co  
 www.toxement.com.co

## FIBERSTRAND N

Micro-fibra de Nylon

TX40T530

### DESCRIPCION

**FIBERSTRAND N** es una micro-fibra monofilamento de Nylon para reforzamiento de concreto, especialmente diseñada para ayudar a mitigar la formación de contracción plástica en el concreto.

**FIBERSTRAND N** cumple con la norma ASTM C-1116: Especificación estándar para concreto y concreto lanzado reforzado con fibra.

**FIBERSTRAND N** cumple con diferentes partes aplicables del International Code Council (ICC) Acceptance Criteria (AC) 32 para fibras sintéticas.

### INFORMACION TECNICA

#### CARACTERISTICAS FISICO QUIMICAS

Material	: Nylon monofilamento
Gravedad Específica	: 1,16
Punto de Fusión	: 260°C (500°F)
Conductividad Eléctrica	: Baja
Absorción de Agua a 20°C	: Despreciable
Longitud de fibra	: ¾" (19 mm)
Resistencia química a los ácidos y álcalis	: Excelente

#### USOS

**FIBERSTRAND N** está especialmente recomendada para aplicación en:

- Concreto lanzado y construcción de piscinas.
- Losas de contrapiso
- Elementos prefabricados
- Concreto decorativo.

#### VENTAJAS

- Controla y mitiga la fisuración por contracción plástica.
- Reduce la segregación y la exudación.
- Provee reforzamiento en tres dimensiones contra la micro – fisuración.
- Reduce la permeabilidad.
- Reduce el costo si se compara contra el uso de malla metálica para control de fisuras por temperatura / Contracción.

- Se adiciona fácilmente a la mezcla de concreto, en cualquier momento antes de la colocación.
- Incrementa la durabilidad de la superficie.

### RENDIMIENTO

**FIBERSTRAND N** se dosifica a razón de 0.6 kg/m<sup>3</sup> de concreto.

### APLICACION

**FIBERSTRAND N** puede ser adicionado a la mezcla de concreto en cualquier momento antes de su colocación.

Generalmente se recomienda adicionar cualquier material de fibra en la planta productora de concreto, durante su mezcla.

**FIBERSTRAND N** debe ser mezclada con el concreto durante mínimo 3 minutos a la máxima velocidad, para asegurar su completa dispersión y uniformidad.

### RECOMENDACIONES ESPECIALES

- El asentamiento de la mezcla puede verse disminuido con la utilización de la fibra. Este efecto se puede contrarrestar con el uso de un aditivo reductor de agua, si es necesario.
- Las fibras nunca deben adicionarse a concretos de cero asentamiento. Se debe asegurar un asentamiento mínimo de 3" (80 mm) antes de la adición de cualquier fibra.
- Consulte la hoja de seguridad del producto antes de su uso.

### ALMACENAMIENTO

**FIBERSTRAND N** debe almacenarse en su empaque original, herméticamente cerrado y bajo techo.

Vida útil en almacenamiento: 3 años.

### PRESENTACION

Bolsa 0,6 kg

Figura 4. Especificaciones microfibra Sika Fiber AD

## HOJA TECNICA DE PRODUCTO

### Sikafiber AD

FIBRA DE POLIPROPILENO PARA EL REFUERZO DE CONCRETO Y MORTERO NO REDUCE EL ASENTAMIENTO DE LAS MEZCLAS

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<p><b>Sikafiber AD</b> es un refuerzo de fibra de polipropileno modificada que disminuye el agrietamiento de concretos y morteros.</p> <p><b>Sikafiber AD</b> está compuesto por una mezcla de monofilamentos reticulados y enrollados y polímeros sintéticos que anulan la tendencia a reducir la trabajabilidad y el asentamiento del concreto, propia de otro tipo de fibras convencionales. Durante la mezcla, <b>Sikafiber AD</b> se distribuye aleatoriamente dentro de la masa de concreto o mortero formando una red tridimensional muy uniforme.</p>																		
<b>USOS</b>	<p>Losas de concreto (placas de piso, pavimentos, etc.)</p> <p>Mortero y concreto proyectados</p> <p>Pañetes de fachada</p> <p>Elementos prefabricados</p> <p>Revestimientos de canales</p>																		
<b>VENTAJAS</b>	<p>La adición de <b>Sikafiber AD</b> aporta las siguientes ventajas:</p> <p>Reducción de la fisuración por retracción e impidiendo su propagación.</p> <p>No modifica la trabajabilidad ni el asentamiento de la mezcla de concreto.</p> <p>Mejora la resistencia al impacto, reduciendo la fragilidad.</p> <p>La acción del <b>Sikafiber AD</b> es de tipo físico y no afecta el proceso de hidratación del cemento.</p> <p>Aumenta la resistencia al fuego en concretos lanzados y convencionales.</p>																		
<b>MODO DE EMPLEO</b>	<p>Se agrega en planta o a pie de obra directamente a la mezcla de concreto o mortero. No disolver en el agua de amasado. Una vez añadido el Sikafiber AD basta con prolongar el mezclado al menos 5 minutos.</p> <p>Dosificación:</p> <p>El <b>Sikafiber AD</b> se empleará en dosificaciones de 1 kg/m<sup>3</sup>.</p> <p>Los concretos a los que se les ha agregado <b>Sikafiber AD</b> cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C1116-95.</p>																		
<b>DATOS TECNICOS</b>	<table> <tr> <td>Densidad real:</td> <td>Aprox. 0,91 kg/l</td> </tr> <tr> <td>Absorción de agua:</td> <td>Ninguna</td> </tr> <tr> <td>Módulo de elasticidad:</td> <td>15.000 kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Alargamiento de rotura:</td> <td>20-30 %</td> </tr> <tr> <td>Resistencia a tracción:</td> <td>300-350 kg/cm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>Resistencia química:</td> <td>Inerte a los álcalis del cemento, ácidos en general, agua de mar, residuos alimetarios y ganaderos, aceites vegetales. No se pudre y es resistente a hongos y bacterias.</td> </tr> <tr> <td>Durabilidad:</td> <td>Indefinida</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de fusión:</td> <td>160-170°C.</td> </tr> <tr> <td>Longitud:</td> <td>19 mm.</td> </tr> </table>	Densidad real:	Aprox. 0,91 kg/l	Absorción de agua:	Ninguna	Módulo de elasticidad:	15.000 kg/cm <sup>2</sup>	Alargamiento de rotura:	20-30 %	Resistencia a tracción:	300-350 kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia química:	Inerte a los álcalis del cemento, ácidos en general, agua de mar, residuos alimetarios y ganaderos, aceites vegetales. No se pudre y es resistente a hongos y bacterias.	Durabilidad:	Indefinida	Temperatura de fusión:	160-170°C.	Longitud:	19 mm.
Densidad real:	Aprox. 0,91 kg/l																		
Absorción de agua:	Ninguna																		
Módulo de elasticidad:	15.000 kg/cm <sup>2</sup>																		
Alargamiento de rotura:	20-30 %																		
Resistencia a tracción:	300-350 kg/cm <sup>2</sup>																		
Resistencia química:	Inerte a los álcalis del cemento, ácidos en general, agua de mar, residuos alimetarios y ganaderos, aceites vegetales. No se pudre y es resistente a hongos y bacterias.																		
Durabilidad:	Indefinida																		
Temperatura de fusión:	160-170°C.																		
Longitud:	19 mm.																		

Hoja Técnica de Producto  
Sikafiber AD  
Versión: 01/2015



<b>PRECAUCIONES</b>	<b>Sikafiber AD</b> no sustituye a las armaduras principales y secundarias resultantes del cálculo. La adición de <b>Sikafiber AD</b> no evita las grietas derivadas de un mal dimensionamiento y aunque ayuda a controlarlo, no evita las grietas producto de un deficiente curado. La adición de <b>Sikafiber AD</b> es compatible con cualquier otro aditivo de <b>Sika</b> . Para cualquier aclaración rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico.
<b>MEDIDAS DE SEGURIDAD</b>	Manténgase fuera del alcance de los niños. Producto no tóxico ni corrosivo. Utilizar lentes de seguridad y mascarilla antipolvos durante su aplicación. Consultar la hoja de seguridad del producto.
<b>ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE</b>	El tiempo de almacenamiento es de 12 meses en su envase original en lugar fresco y bajo techo.
<b>PRESENTACION</b>	Bolsas de 1 kg Bultos con 20 unidades.
<b>CODIGOS R/S</b>	R: 20/21/22/42 S: 2/7/20/22/24/25/26/28/29



**Sika Colombia S.A.**  
Vereda Canavita, km 20.5  
Autopista Norte, Tocancipá  
Conmutador: 878 6333  
Colombia - web:col.sika.com


**Hoja Técnica de Producto**  
**Sikafiber AD**  
Versión: 01/2015

**NOTA**

La información, y en particular las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos **Sika**, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de **Sika** sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de **Sika**. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. **Sika** se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todas las órdenes de compra son aceptadas con sujeción a nuestros términos de venta y despacho publicadas en la página web: col.sika.com. Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.



Figura 5. Especificaciones macrofibra Sika Fiber Force PP/PE - 700/55



**CONSTRUYENDO CONFIANZA**

## HOJA TECNICA DE PRODUCTO

# SikaFiber® Force PP/PE-700/55

---

### FIBRA MACRO SINTÉTICA

---

<b>DESCRIPCION DEL PRODUCTO</b>	Fibras macro sintéticas fabricadas a partir de polipropileno virgen y polímeros de alto desempeño y deformadas mecánicamente para dar una forma apropiada que maximiza el anclaje en el hormigón, especialmente diseñada para el refuerzo del concreto. Fibra monofilamento de última tecnología y alto desempeño, diseñada para satisfacer requerimientos que demandan los trabajos en concreto lanzado y convencional. Es adecuada para sustituir mallas electrosoldadas y fibras de acero usuales en placas de pisos y concretos lanzados.																												
<b>USOS</b>	Se utiliza en las siguientes aplicaciones: Soporte y estabilización con concreto proyectado en túneles y galerías. Rehabilitación estructural. Prefabricados y concretos livianos. Reforzamiento sísmico. Revestimiento de canales. Estabilización de taludes. Piscinas. Tanques. Protección contra desprendimientos por fuego. Reparación y protección de estructuras marinas. Muros de contención. Rehabilitación y construcción de acueductos. Zonas en que se requiere materiales no metálicos. Losas sobre terreno. Aplicaciones mineras. Reforzamiento de pisos. Pavimentos rígidos.																												
<b>CARACTERISTICAS VENTAJAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementa la tenacidad del concreto y la resistencia al impacto.</li> <li>• No reduce la manejabilidad como otras fibras autofibrilantes.</li> <li>• Disminuye la tendencia al agrietamiento en estado fresco como endurecido.</li> <li>• Máxima resistencia al arrancamiento dentro de la matriz del concreto.</li> <li>• Incrementa ductilidad y resistencia residual.</li> <li>• Reduce rebote en el concreto lanzado.</li> <li>• Es mas eficiente que la malla electrosoldada para prevenir la fisuración en estado plástico.</li> <li>• Reduce el desgaste en bombas y tuberías.</li> <li>• No es magnética, ni se oxida</li> <li>• Mejora la durabilidad del concreto reforzado.</li> <li>• Resistencia química y a álcalis</li> <li>• Segura y fácil de aplicación en la mezcla</li> <li>• Reduce costos de construcción frente a otras metodologías de refuerzo.</li> </ul>																												
<b>DATOS TECNICOS</b>	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">Largo:</td> <td style="width: 33%;">55 mm</td> <td style="width: 33%;">Tipo de Fibra:</td> <td style="width: 33%;">Monofilamento</td> </tr> <tr> <td>Color:</td> <td>Gris oscuro</td> <td>Gravedad específica:</td> <td>1.3 kg/l</td> </tr> <tr> <td>Resistencia a la tracción:</td> <td>360 MPa</td> <td>Absorción:</td> <td>0%</td> </tr> <tr> <td>Punto de ablandamiento:</td> <td>160°C</td> <td>Punto de ignición:</td> <td>260°C</td> </tr> <tr> <td>Conductividad térmica:</td> <td>Baja</td> <td>Conductividad eléctrica:</td> <td>Baja</td> </tr> <tr> <td>Resistencia a álcalis:</td> <td>Alta</td> <td>Módulo elástico</td> <td>4.8 MPa</td> </tr> <tr> <td>Resistencia a sales y ácidos:</td> <td>Alta</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Largo:	55 mm	Tipo de Fibra:	Monofilamento	Color:	Gris oscuro	Gravedad específica:	1.3 kg/l	Resistencia a la tracción:	360 MPa	Absorción:	0%	Punto de ablandamiento:	160°C	Punto de ignición:	260°C	Conductividad térmica:	Baja	Conductividad eléctrica:	Baja	Resistencia a álcalis:	Alta	Módulo elástico	4.8 MPa	Resistencia a sales y ácidos:	Alta		
Largo:	55 mm	Tipo de Fibra:	Monofilamento																										
Color:	Gris oscuro	Gravedad específica:	1.3 kg/l																										
Resistencia a la tracción:	360 MPa	Absorción:	0%																										
Punto de ablandamiento:	160°C	Punto de ignición:	260°C																										
Conductividad térmica:	Baja	Conductividad eléctrica:	Baja																										
Resistencia a álcalis:	Alta	Módulo elástico	4.8 MPa																										
Resistencia a sales y ácidos:	Alta																												
<b>MODO DE EMPLEO</b>	<p><b>Consumo:</b> Depende de aplicación, diseño de mezcla y resistencias requeridas. Normalmente se utiliza entre 2 a 9 kg de <b>SikaFiber Force PP/PE-700/55</b> por m<sup>3</sup> de concreto.</p> <p>La dosificación previamente establecida por metro cúbico, deberá adicionarse en el camión mezclador previo a los otros componentes del concreto. Después de la adición de las fibras el concreto deberá ser mezclado por tiempo suficiente (mínimo 5 minutos) para asegurar una distribución uniforme de las fibras en el concreto. Las fibras en el concreto pueden ser bombeadas ó colocadas directamente con equipos convencionales.</p> <p><b>SikaFiber Force PP/PE-700/55</b> es compatible con cualquier membrana de curado, súper plastificantes, reductores de agua, endurecedores y recubrimientos.</p>																												
<b>MEDIDAS DE SEGURIDAD</b>	<p>No es necesaria la protección para el manejo de estas fibras.</p> <p>Para información y consejos sobre seguridad en la manipulación, almacenamiento disposición de productos químicos, los usuarios deben referirse a la ficha de seguridad vigente, la cual contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y otros datos relativos a seguridad.</p>																												

**Hoja Técnica de Producto**  
SikaFiber Force PP/PE-700/55  
Versión: 01/2015

## ANEXO D. MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

En el presente anexo se muestran diferentes valores de módulo de elasticidad obtenidos en laboratorio y calculados por referencia bibliográfica. Se tendrá como punto de comparación los resultados obtenidos para la muestra patrón “M1-3” (Véase el cuadro 19) y la muestra patrón con adición de 185,00g de microfibras Fiber Strand N “F1-I-N-5, muestra 3” (Véase el Cuadro 22). Los valores de módulo de elasticidad se determinan con aproximación a 200MPa tal y como se describe en el numeral 7.1 de la norma INV E – 424. A continuación se presentan los valores de módulo de elasticidad obtenidos por diferentes métodos.

### • LABORATORIO DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS UPTC, TUNJA

Los módulos de elasticidad del concreto obtenidos en el “Laboratorio de Materiales y Estructuras perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, seccional Tunja” para las diferentes muestras de concreto con y sin adición de fibras sintéticas se muestran en la tabla 1.

Cuadro 1. Valores de módulo de elasticidad y densidad obtenidos en laboratorio UPTC, seccional Tunja

MUESTRA	MÓDULO DE ELASTICIDAD		DENSIDAD	
	VALOR MÍNIMO (MPa)	VALOR MÁXIMO (MPa)	VALOR MÍNIMO (Kg/m <sup>3</sup> )	VALOR MÁXIMO (Kg/m <sup>3</sup> )
PATRÓN	32200,00	37400,00	2300,00	2310,00
PATRÓN + TOC FIBRA 500	31000,00	39000,00	2250,00	2320,00
PATRÓN + TUF STRAND SF	32200,00	56200,00	2300,00	2330,00
PATRÓN + FIBER STRAND N	31200,00	46200,00	2250,00	2300,00
PATRÓN + SIKA FIBER AD	35800,00	45200,00	2260,00	2330,00
PATRÓN + SIKA FIBER FORCE	35200,00	42800,00	2290,00	2340,00

Fuente: Elaboración propia.





Los valores de módulo de elasticidad obtenidos en laboratorio para la muestra M1-3 y F1-I-N-5 son 37400MPa y 35400MPa respectivamente.

### • LABORATORIO DE PRUEBAS Y ENSAYOS, PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Los valores de módulo de elasticidad obtenidos en laboratorio para la muestra M1-3 y F1-I-N-5 son 24000MPa y 23800MPa respectivamente. En las Figuras 1 y 2 se presentan los resultados de laboratorio de módulo de elasticidad y relación de Poisson de las muestras M1-3 y F1-I-N-5 realizados en el “Laboratorio de pruebas y ensayos de la Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.”




Figura 1. Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson muestra patrón M1-3

 <b>LABORATORIO DE PRUEBAS Y ENSAYOS</b> FORMATO I-RE-08		PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERIA DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Cra 7 No. 40-62 - Edificio José Gabriel Maldonado S.J. Bogotá Tel.:(57-1) 3208320 Ext. 5288/69 Fax: Ext. 5373	
<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DEL CONCRETO EN CILINDROS A COMPRESION</b> INFORME DE ENSAYO			
II INSTRUCTIVO DE ENSAYO: IE-RE-08		PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: NTC 4025 - 2010	
CÓDIGO ORDEN: <b>030-17</b> Proyecto: <b>Tesis Maestría Aporte de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto</b>		CLIENTE: <b>Henry Alirio Lopez Patiño</b> DIRECCIÓN: <b>Carrera 20 No 11 Bis 11 (Sogamoso)</b>	
Referencia: 030-1		Muestra: MP-3	
Tipo de Falla: ---		Fecha Recepción: 2017-04-03	
Historial/Medio Ambiente: ---		Fecha de Ensayo: 2017-04-07	
Descripción: Cilindro de concreto.			
Diámetro (mm): 151,1	Esfuerzo Máximo (kg/cm <sup>2</sup> ): 105		
Altura (mm): 304,9	Esfuerzo Máximo (MPa): 10		
Peso de la Muestra (g): 12506	Módulo de Elasticidad Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ): 244124 ± 19208 *		
Peso Unitario (g/cm <sup>3</sup> ): 2,29	Módulo de Elasticidad Promedio (MPa): 23918 ± 1882 *		
Relacion L/D: 2,02	Coefficiente de Poisson: 0,133		
	Factor de Corrección: 1,0		
<b>CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN</b>			
			
<b>OBSERVACIONES:</b> _____ _____ _____			
<small>* El valor reportado corresponde a la incertidumbre calculada con un nivel de confianza del 95% y un factor de expansión k=2.          ** Este informe no podrá ser reproducido parcial o completamente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito por parte del laboratorio que lo emite.          *** Los resultados contenidos en este informe sólo hacen referencia al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos de las muestras relacionadas.</small>			
 OSCAR RODRIGUEZ		 JEISSON HURTADO	
CALCULÓ: COORDINADOR DE LABORATORIO		REVISÓ: INGENIERO DE LABORATORIO	

Fuente: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Módulo de elasticidad estático del concreto en cilindros a compresión: Informe de ensayo. Laboratorio de pruebas y ensayos; MP-3. Bogotá D.C., 2017.

Figura 2. Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson muestra F1-I-N-5



**LABORATORIO DE PRUEBAS  
Y ENSAYOS**  
FORMATO I-RE-08

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL  
Cra 7 No. 40-62 - Edificio José Gabriel Maldonado S.J. Bogotá  
Tel.: (57-1) 3208320 Ext. 5268/69 Fax: Ext. 5373

**MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DEL CONCRETO  
EN CILINDROS A COMPRESIÓN**


INFORME DE ENSAYO

II INSTRUCTIVO DE ENSAYO: IE-RE-08 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: NTC 4025 - 2010

CÓDIGO ORDEN: <b>030-17</b>  PROYECTO: <b>Tesis Maestría Aporte de las fibras sintéticas en el módulo de rotura del concreto</b>	CLIENTE: <b>Henry Alirio Lopez Patiño</b>  DIRECCIÓN: <b>Carrera 20 No 11 Bis 11 (Sogamoso)</b>
Referencia: 030-2 Tipo de Falla: --- Historial/Medio Ambiente: --- Descripción: Cilindro de concreto.	Muestra: M5-3 Fecha Recepción: 2017-04-03 Fecha de Ensayo: 2017-04-07

Diámetro (mm): 151,8	Esfuerzo Máximo (kg/cm <sup>2</sup> ): 107
Altura (mm): 305,2	Esfuerzo Máximo (MPa): 11
Peso de la Muestra (g): 12503	Módulo de Elasticidad Promedio (kg/cm <sup>2</sup> ): 242398 ± 19073 *
Peso Unitario (g/cm <sup>3</sup> ): 2,26	Módulo de Elasticidad Promedio (MPa): 23749 ± 1869 *
Relacion L/D: 2,01	Coefficiente de Poisson: 0,19
	Factor de Corrección: 1,0

**CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN**





**OBSERVACIONES:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\* El valor reportado corresponde a la incertidumbre calculada con un nivel de confianza del 95% y un factor de expansión k=2.  
 \*\* Este informe no podrá ser reproducido parcial o completamente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito por parte del laboratorio que lo emite.  
 \*\*\* Los resultados contenidos en este informe sólo hacen referencia al momento y condiciones en que se realizaron los ensayos de las muestras relacionadas.

  
 OSCAR RODRIGUEZ  
 CALCULÓ: COORDINADOR DE LABORATORIO

  
 JEISSON HURTADO  
 REVISÓ: INGENIERO DE LABORATORIO

z

Fuente: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA. Módulo de elasticidad estático del concreto en cilindros a compresión: Informe de ensayo. Laboratorio de pruebas y ensayos; M5-3. Bogotá D.C., 2017.

- **MODULO DE ELASTICIDAD, NSR -10**

Con base a la NSR-10 en C.8.5 el módulo de elasticidad del concreto se puede calcular como  $w_c^{1,5} * 0,043\sqrt{f'c}$  para concretos cuya densidad está entre los 1440 kg/m<sup>3</sup> y 2560kg/m<sup>3</sup>, o podrá calcularse el módulo de elasticidad como  $4700\sqrt{f'c}$  cuando no se disponga del valor de la masa unitaria del concreto.

Los valores de densidad obtenidos para la muestra M1-3 y F1-I-N-5 son 2300kg/m<sup>3</sup> y 2260kg/m<sup>3</sup> respectivamente y sus resistencias promedios a la compresión son 25,25MPa para la muestra M1-3 y 25,85MPa para la muestra F1-I-N-5. Los módulos de elasticidad calculados son:

- Muestra M1-3

$$Ec = 2300^{1,5} * 0,043\sqrt{25,25} = 23833,67MPa \approx 23800,00MPa$$

$$Ec = 4700\sqrt{25,25} = 23617,20MPa \approx 23600,00MPa$$

- Muestra F1-I-N-5

$$Ec = 2260^{1,5} * 0,043\sqrt{25,85} = 23488,83MPa \approx 23400,00MPa$$

$$Ec = 4700\sqrt{25,85} = 23896,16MPa \approx 23800,00MPa$$

La planta de Colconcreto S.A. tiene su fuente de explotación del agregado grueso en la vereda Las Monjas del municipio de Tibasosa y de acuerdo a la geología local, la roca del sector es de origen sedimentario y corresponden a calizas pertenecientes a la formación Tibasosa. Con base a lo anterior y teniendo en cuenta lo descrito en el CR8.5 de la NSR -10 para agregados gruesos de origen sedimentario, el módulo de elasticidad se puede calcular como  $w_c^{1,5} * 0,031\sqrt{f'c}$  o podrá calcularse el módulo de elasticidad como  $3600\sqrt{f'c}$  cuando no se disponga del valor de la masa unitaria del concreto. Los módulos de elasticidad calculados son:

- Muestra M1-3

$$Ec = 2300^{1,5} * 0,031\sqrt{25,25} = 17182,41MPa \approx 17200,00MPa$$

$$Ec = 3600\sqrt{25,25} = 18089,77MPa \approx 18000,00MPa$$

- Muestra F1-I-N-5

$$Ec = 2260^{1,5} * 0,031\sqrt{25,85} = 16933,81MPa \approx 17000,00MPa$$

$$Ec = 3600\sqrt{25,85} = 18303,44MPa \approx 18400,00MPa$$

En el cuadro 2 se presenta un resumen de los valores de módulos de elasticidad obtenidos para la muestra patrón (M1-3) y la muestra patrón con adición de 185,00g de microfibra Fiber Strand N (F1-I-N-5, muestra 3), obtenidos en diferentes laboratorios y calculados por diferentes fórmulas de acuerdo a lo dispuesto en el título C en el numeral C.8.5 de la NSR-10.

Teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad es uno de los parámetros más importantes para el diseño de estructuras de concreto como losas de pavimento rígido y concreto reforzado como edificaciones, puentes, box culvert entre otros, es indispensable conocer el valor real del módulo de elasticidad del concreto, ya que este influye directamente en los esfuerzos y deformaciones a las que van estar sometidas las estructuras ante las diferentes sollicitaciones que pueden actuar sobre ellas, puesto que la sensibilidad entre el módulo de elasticidad del concreto y estas variables es alta. En la construcción de estructuras de concreto reforzado, la calidad del concreto se acepta y/o mide fallando cilindros de concreto a compresión y en estructuras de pavimentos rígidos, las losas se aceptan o rechazan fallando vigas prismáticas a flexión, sin embargo desde el punto de vista del diseño, valores de módulos de elasticidad bajos conllevan a la construcción de estructuras sobrerreforzadas (edificaciones, puentes, box culvert entre otros) y espesores altos en la construcción de las losas de los pavimentos rígidos. Por tal razón es importante conocer el valor real del módulo de elasticidad del concreto a la hora de diseñar y construir las estructuras de concreto.

Con base a los resultados de módulos de elasticidad mostrados en el cuadro 2, se observa que los valores de módulo de elasticidad obtenidos de la experimentación realizada en los laboratorios de la UPTC son altos, los valores de módulos de elasticidad calculados a partir del origen del agregado grueso tal y como lo describe la NSR-10 en CR.8.5 son relativamente bajos, mientras que los valores obtenidos en los laboratorios de la Universidad Javeriana se ajustan a los calculados a partir de la densidad y resistencia a la compresión de los cilindros de concreto tal y como lo describe la NSR-10 en C.8.5. La variabilidad en los resultados de los módulos de elasticidad, puede indicar deficiencia y/o falta de calibración en los equipos utilizados en los ensayos, generando que siempre se encuentren variaciones de resultados entre un laboratorio y otro; de igual manera, el uso de las diferentes correlaciones para el cálculo de módulo de elasticidad proporciona valores diferentes en los resultados calculados.

Cuadro 2. Valores de módulos de elasticidad obtenidos por diferentes metodologías

Muestra	UPTC	UNIVERSIDAD JAVERIANA	Numeral C.8.5 NSR-10		Comentario CR8.5 NSR-10	
			$w_c^{1.5} * 0,043\sqrt{f'c}$	$4700\sqrt{f'c}$	$w_c^{1.5} * 0,031\sqrt{f'c}$	$3600\sqrt{f'c}$
M1-3	37400 MPa	24000 MPa	23800 MPa	23600 MPa	17200 MPa	18000 MPa
F1-I-N-5	35400 MPa	23800 MPa	23400 MPa	23800 MPa	17000 MPa	18400 MPa

Fuente: Elaboración propia.