

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EFFECTO DE LAS FIBRAS DE ACERO Y POLIPROPILENO EN LA
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO PARA
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR:

Bach. VARGAS ORTIZ, GUADALUPE BRIGITTE

Bach. YATACO BARREDA, ALVARO GUSTAVO

Asesor: M. Sc. Ing. HUAMÁN GUERRERO, NÉSTOR WILFREDO

LIMA – PERÚ

2020

DEDICATORIA

Dedico esta tesis especialmente a mis padres Edita Ortiz Bruno y José Vargas García, a mi hermano José y a toda mi familia, quienes son mi fortaleza en todo momento y me han apoyado a lo largo de mi etapa universitaria y en todo el trayecto del desarrollo de esta tesis.

Guadalupe Brigitte Vargas Ortiz

Dedico la presente tesis a mis padres Ruth y Guido, quienes guían mi camino de formación personal y profesional; a mis hermanos Héctor y Danitza, por su comprensión y apoyo infinito; y a mis abuelos por sus consejos y aliento desmesurado.

Alvaro Gustavo Yataco Barreda

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a los docentes de la Universidad Ricardo Palma por sus enseñanzas y conocimientos compartidos en nuestra formación profesional y en especial al Ing. Néstor W. Huamán Guerrero por habernos permitido desarrollar la presente investigación bajo su dirección y asesoramiento.

Guadalupe Vargas y Alvaro Yataco

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Descripción y formulación del problema	2
1.1.1. Problema general.....	3
1.1.2. Problemas específicos	3
1.2. Objetivo de la investigación	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Justificación e importancia de la investigación.....	4
1.4. Limitaciones del estudio.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Marco histórico.....	5
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema.....	6
2.2.1. Investigaciones nacionales.....	6
2.2.2. Investigaciones internacionales	8
2.3. Bases teóricas	10
2.3.1. Pavimentos	10
2.3.1.1. Tipos de pavimentos.....	10
2.3.1.2. Factores que influyen en la performance de los pavimentos	12
2.3.1.3. Exigencias técnicas para la construcción de pavimentos	13
2.3.2. Pavimento rígido o hidráulico.....	14
2.3.2.1. Tipos de pavimentos rígidos	14
2.3.2.2. Componentes estructurales del pavimento rígido	15
2.3.2.3. Materiales del pavimento rígido.....	17
2.3.2.4. Formación de fisuras por flexión en pavimentos rígidos	22
2.3.2.5. Factores de diseño del pavimento rígido.....	25
2.3.2.6. Resistencia a la flexión del concreto (MR).....	26
2.3.2.7. Ensayos de resistencia a la flexión del concreto	27

2.3.3. Concreto reforzado con fibras (CRF)	33
2.3.3.1. Tipos de fibras	34
2.3.3.2. Fibras de acero	36
2.3.3.3. Fibras de polipropileno.....	37
2.3.3.4. Parámetros básicos de las fibras.....	39
2.3.3.5. Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras.....	44
2.3.3.6. Ventajas y desventajas del uso de fibras	48
2.3.3.7. Aplicaciones de las fibras.....	50
2.3.3.8. Normas referentes al concreto reforzado con fibras.....	51
2.4. Definición de términos básicos	52
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	54
3.1. Hipótesis	54
3.1.1. Hipótesis general.....	54
3.1.2. Hipótesis específicas	54
3.2. Variables.....	54
3.2.1. Definición conceptual de las variables	54
3.2.2. Operacionalización de las variables.....	55
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	56
4.1. Tipo, método, nivel y diseño de la investigación	56
4.1.1. Tipo de investigación.....	56
4.1.2. Método de la investigación	56
4.1.3. Nivel de investigación.....	56
4.1.4. Diseño de la investigación	56
4.2. Población de estudio.....	57
4.3. Diseño muestral.....	57
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	57
4.5. Procedimientos para la recolección de datos.....	58
4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	58
CAPÍTULO V: USO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS	59
5.1. Mercado de fibras a nivel nacional e internacional	59
5.2. Obras ejecutadas de pavimentos de concreto reforzado con fibras en Perú.....	63

5.2.1. Mejoramiento de los Pasajes Cleto Martínez, General Montero, Manuel de la Torre y Coronel Bustamante, Pucallpa.....	63
5.2.2. Mejoramiento vial del Jirón Gonzáles Prada de la ciudad de Puerto Maldonado, Madre de Dios	63
5.2.3. Mejoramiento de la Av. Sánchez Cerro, Piura	64
5.2.4. Almacén Cormin, Callao	65
5.2.5. Patio Norte Sinchi Roca en el distrito de Comas, Lima	66
5.3. Obras ejecutadas a nivel internacional de pavimentos de concreto reforzado con fibras	67
5.3.1. Experiencias en Brasil.....	67
5.3.2. Experiencias en Chile	67
5.3.3. Experiencias en Costa Rica.....	68
5.3.4. Experiencias en Guatemala.....	68
5.3.5. Experiencias en México	68
5.3.6. Experiencias en España.....	69
5.3.7. Experiencias en Estados Unidos	69
CAPÍTULO VI: MÉTODOS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO FIBROREFORZADOS	75
6.1. Métodos de diseño de losas de concreto reforzadas con fibras	75
6.1.1. Metodología de diseño con el software PAVE 2008	78
6.2. Evaluación de costos de producción de pavimentos de concreto reforzados con fibras	83
CAPÍTULO VII: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	89
7.1. Clasificación de la información de las investigaciones consultadas	89
7.2. Presentación y análisis de resultados de resistencia a la flexión del concreto hidráulico vs. la dosificación de fibra, obtenidos de investigaciones nacionales e internacionales	92
7.2.1. Concreto hidráulico reforzado con fibras de acero	92
7.2.2. Concreto hidráulico reforzado con macrofibras de polipropileno	100
7.2.3. Concreto hidráulico reforzado con microfibras de polipropileno.....	106
7.3. Contrastación de hipótesis.....	111
7.3.1. Contrastación de hipótesis específica N° 01	111

7.3.2. Contrastación de hipótesis específica N° 02	114
7.3.3. Contrastación de hipótesis general.....	119
CONCLUSIONES	120
RECOMENDACIONES.....	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
ANEXOS	132
Anexo N° 01: Matriz de consistencia.....	133
Anexo N° 02: Características de las fibras utilizadas en los ensayos	134
Anexo N° 03: Resultados a los 28 días de los ensayos de resistencia a flexión del concreto	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Especificaciones técnicas de pavimentos	13
Tabla N° 2: Granulometría del agregado fino	19
Tabla N° 3: Granulometría del agregado grueso.....	19
Tabla N° 4: Fórmulas de correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión.....	33
Tabla N° 5: Características de macrofibras y microfibras	36
Tabla N° 6: Propiedades de las fibras de polipropileno	37
Tabla N° 7: Características mecánicas de las fibras.....	43
Tabla N° 8: Operacionalización de las variables	55
Tabla N° 9: Marcas de fibras a nivel nacional	59
Tabla N° 10: Marcas de fibras a nivel internacional.....	60
Tabla N° 11: Marcas de fibras a nivel internacional.....	61
Tabla N° 12: Proyectos de overlays reforzados con fibras en Georgia.....	70
Tabla N° 13: Proyectos de overlays reforzados con fibras en Illinois	71
Tabla N° 14: Celdas de la carretera MnRoad reforzadas con fibras en Minnesota	73
Tabla N° 15: Proyectos de overlays reforzados con fibras en Kansas	74
Tabla N° 16: Cálculo del espesor de la losa de concreto con el método AASHTO 93 ..	76
Tabla N° 17: Cálculo del espesor de la losa de concreto con fibras de acero con el método AASHTO 93	77
Tabla N° 18: Costo unitario del concreto simple.....	83
Tabla N° 19: Resumen de costos para la producción de un pavimento con refuerzo convencional	85
Tabla N° 20: Costo unitario del concreto con fibras de acero con una dosificación de 30 kg/m3.	85
Tabla N° 21: Resumen de costos para la producción de un pavimento reforzado con fibras de acero.....	86
Tabla N° 22: Costo unitario del concreto con fibras de polipropileno con una dosificación de 2 kg/m3	87
Tabla N° 23: Resumen de costos para la producción de un pavimento reforzado con fibras de polipropileno	87
Tabla N° 24: Resumen de comparación de costos de producción de pavimentos rígidos	88

Tabla N° 25: Cantidad total de ensayos de resistencia a flexión del concreto con fibras de acero y polipropileno realizados por las investigaciones consultadas	89
Tabla N° 26: Cantidad de macrofibras y microfibras de polipropileno utilizadas por las investigaciones consultadas	89
Tabla N° 27: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con fibras de acero	93
Tabla N° 28: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con fibras de acero	94
Tabla N° 29: Distribución por intervalos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero.....	95
Tabla N° 30: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con macrofibras de polipropileno	101
Tabla N° 31: Distribución por intervalos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno	102
Tabla N° 32: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con microfibras de polipropileno	107
Tabla N° 33: Distribución por intervalos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno.....	108
Tabla N° 34: Valor crítico de la distribución t de Student para la hipótesis específica N° 01	113
Tabla N° 35: Valor crítico de la distribución t de Student para la hipótesis específica N° 02	116
Tabla N° 36: Valores del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno.....	117
Tabla N° 37: Valor crítico de la distribución t de Student para la hipótesis específica N° 02	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Estructura de un pavimento flexible	10
Figura N° 2: Estructura de un pavimento rígido	11
Figura N° 3: Tipos de pavimentos rígidos	15
Figura N° 4: Partes del pavimento rígido.....	16
Figura N° 5: Trasmisión de cargas vehiculares al pavimento.....	22
Figura N° 6: Modelo estructural simplificado de un pavimento rígido	23
Figura N° 7: Esfuerzos en sección de la losa de concreto en rango elástico	23
Figura N° 8: Formación y propagación de fisuras por esfuerzos de flexión.....	24
Figura N° 9: Ensayos a tracción directa, indirecta y a flexión del concreto hidráulico ..	27
Figura N° 10: Esquema del ensayo a flexión con cargas a los tercios de la viga	28
Figura N° 11: Esquema del ensayo a flexión con carga central en la viga	29
Figura N° 12: Diferentes configuraciones del ensayo de panel cuadrado.....	31
Figura N° 13: Configuración del ensayo de panel circular	32
Figura N° 14: Microfibras y macrofibras de polipropileno	38
Figura N° 15: Tipos de fibras de polipropileno	39
Figura N° 16: Formas en dirección longitudinal de fibras de acero	40
Figura N° 17: Formas de la sección transversal de fibras de acero	40
Figura N° 18: Fibras encoladas y sueltas de acero.....	41
Figura N° 19: Formación de "erizos" o aglomeración de fibras	41
Figura N° 20: Gráfica de energía absorbida vs esbeltez de la fibra (L/D).....	42
Figura N° 21: Respuesta de ensayo a flexión mediante gráfica carga vs deflexión.....	46
Figura N° 22: Tenacidad del concreto fibroreforzado y sin reforzar	47
Figura N° 23: Mecanismo de control de propagación de las fisuras.....	48
Figura N° 24: Rotura de probeta de concreto reforzado con fibras de acero	49
Figura N° 25: Antes y después del mejoramiento vial del Jr. Gonzales Prada, Puerto Maldonado.	64
Figura N° 26: Obra vial concluida de la Av. Sánchez Cerro tramo Av. Gullman – Av. Chulucanas.....	65
Figura N° 27: Ejecución de obra Almacén Cormin, Lima- Perú	66
Figura N° 28: Desplazamiento de losas sin fibras en proyecto North Lorand Road	72
Figura N° 29: Métodos de diseños del espesor de losa y códigos empleados en PAVE 2008	78

Figura N° 30: Datos de entrada para verificación del cálculo del espesor de losas de concreto fibroreforzadas en PAVE 2008	79
Figura N° 31: Verificación ELU en PAVE 2008	80
Figura N° 32: Verificación ELS en PAVE 2008	81
Figura N° 33: Flujograma de procesos de diseño en PAVE 2008	82
Figura N° 34: Marcas de fibras de acero utilizadas en las investigaciones nacionales consultadas.....	90
Figura N° 35: Marcas de fibras de polipropileno utilizadas en las investigaciones nacionales consultadas.....	90
Figura N° 36: Marcas de fibras de acero utilizadas en las investigaciones internacionales consultadas.....	91
Figura N° 37: Marcas de fibras de polipropileno utilizadas en las investigaciones internacionales consultadas.....	91
Figura N° 38: Resistencia a flexión del concreto vs. Dosificación de fibras de acero según la resistencia de diseño f^c	92
Figura N° 39: Incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de fibras de acero	96
Figura N° 40: Curvas de tendencia del incremento porcentual de la resistencia flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de fibras de acero	97
Figura N° 41: Modelo simplificado del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero	99
Figura N° 42: Incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de macrofibras de polipropileno.....	102
Figura N° 43: Curvas de tendencia del incremento porcentual de la resistencia flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de macrofibras de polipropileno	104
Figura N° 44: Modelo simplificado del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno	105
Figura N° 45: Incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de microfibras de polipropileno	109
Figura N° 46: Modelo simplificado del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno	110
Figura N° 47: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero mediante la función promedio.....	112
Figura N° 48: Contrastación de la hipótesis específica N° 01.....	113

Figura N° 49: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno mediante la función promedio	114
Figura N° 50: Contrastación de la hipótesis específica N° 02, con macrofibras de polipropileno	116
Figura N° 51: Contrastación de la hipótesis específica N° 02, con microfibras de polipropileno	119

RESUMEN

La investigación evaluó la influencia de las fibras de acero y fibras de polipropileno en la resistencia a flexión del concreto para pavimentos rígidos mediante la revisión de investigaciones a nivel nacional e internacional, con la finalidad de dar una alternativa para mejorar la resistencia a la flexión y reducir el fenómeno de fisuración en el concreto, dando como resultado pavimentos rígidos que cumplan con el nivel de servicio durante su vida útil. Se desarrolló un análisis estadístico de los resultados del ensayo de resistencia a flexión del concreto de las investigaciones revisadas, para determinar la correlación entre el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto y la dosificación de fibras de acero y polipropileno. Los resultados del análisis estadístico mostraron que el máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto es del 37 % con una dosificación óptima de fibras de acero de 37 Kg/m³, del 18% con una dosificación óptima de macrofibras de polipropileno de 5 kg/m³, y del 12% con una dosificación óptima de microfibras de polipropileno de 0.45 kg/m³. Finalmente se concluyó que existe una alta correlación entre el incremento de la resistencia a la flexión del concreto respecto a la dosificación de fibra que se adicione; asimismo la incorporación de fibras tiene una dosificación óptima y mayor a esta dosificación óptima no se logra un mayor incremento en la resistencia a flexión del concreto.

Palabras Clave: Fibras de polipropileno, Fibras de acero, Concreto reforzado con fibras, Pavimento rígido, Resistencia a flexión, Dosificación de fibra.

ABSTRACT

The research evaluated the influence of steel fibers and polypropylene fibers on the flexural strength of concrete for rigid pavements by reviewing national and international research, in order to provide an alternative to improve flexural strength and reduce the phenomenon of cracking in concrete, resulting in rigid pavements that meet the service level during their useful life. A statistical analysis of the results of the concrete flexural strength test from the reviewed investigations was developed to determine the correlation between the percentage increase in concrete flexural strength and the dosage of steel and polypropylene fibers. The results of the statistical analysis showed that the maximum percentage increase in the flexural strength of concrete is 37% with an optimal dosage of steel fiber of 37 Kg / m³, 18% with an optimal dosage of polypropylene macrofibers of 5 kg / m³, and 12% with an optimal dosage of polypropylene microfibers of 0.45 kg / m³. Finally, it was concluded that there is a high correlation between the increase in flexural strength of concrete with respect to the dosage of fiber added; also the incorporation of fibers has an optimal dosage and greater than this optimal dosage, a greater increase in the flexural strength of the concrete is not achieved.

Keywords: Polypropylene macrofibers, Steel fibers, Fiber-reinforced concrete, Rigid pavement, Flexural strength, Fiber dosage.

INTRODUCCIÓN

La formación de fisuras y grietas en los pavimentos de concreto se debe principalmente a la baja resistencia a tracción del concreto cuando es sometido a cargas superiores a las de diseño o a cargas cíclicas, por lo que esta investigación plantea el uso de pavimentos de concreto reforzados con fibras de acero y fibras de polipropileno, ya que el uso de fibras mejora la resistencia a flexión y reduce la formación de fisuras en el concreto, dando como resultado pavimentos rígidos que cumplan con el nivel de servicio durante su vida útil.

La investigación analiza la influencia de la incorporación de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto para pavimentos rígidos, mediante los resultados de 31 investigaciones nacionales y 13 investigaciones internacionales.

En el desarrollo de la investigación, en el quinto capítulo se describe el mercado nacional e internacional de fibras de acero y polipropileno, y las obras ejecutadas en Perú e internacionalmente de pavimentos de concreto reforzados con fibras; en el sexto capítulo se describe las metodologías utilizadas en el diseño de las losas de concreto hidráulico reforzado con fibras de acero y polipropileno y se realiza una evaluación de los costos de producción de pavimentos de concreto reforzados con fibras.

El último capítulo desarrolla un análisis estadístico de los resultados de la resistencia a flexión del concreto de las investigaciones revisadas, para determinar la correlación entre el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto y la dosificación de fibras de acero y fibras de polipropileno, a partir de ahí se presenta la interpretación de los resultados y la contrastación de las hipótesis. Finalmente, en base a ello, se plantean las conclusiones y las recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

Las fallas más frecuentes en pavimentos de concreto simple son las fisuras y grietas. El concreto simple es un material con buena resistencia a compresión, pero con baja resistencia a tracción; por lo que, ante cargas vehiculares superiores a la carga de diseño o exceso de cargas repetitivas sobre el pavimento, da como consecuencia el inicio y propagación de fisuras, que se inician en las capas inferiores de las losas de concreto, las mismas que avanzan hacia las capas superiores. Las aberturas de las fallas permiten el ingreso de agua, lo que daña la base del pavimento, que posteriormente generará que las fallas en el concreto sean mayores. Esto genera un rápido deterioro del pavimento, además de mayores gastos de mantenimiento y disminución en la comodidad y seguridad en el tránsito vehicular.

En la construcción de pavimentos hay soluciones convencionales al problema de la baja resistencia a tracción del concreto, tales como reforzar las losas de concreto con malla de acero corrugado en la parte inferior de la losa ya que ahí se generan los esfuerzos a tracción o también incrementar el espesor de las losas de concreto simple para disminuir los esfuerzos de tracción; sin embargo, investigaciones nacionales e internacionales vienen demostrando que el uso de concreto reforzado tanto con fibras de acero como con fibras de polipropileno mejoran la resistencia a la flexión, aportan mayor ductilidad y tenacidad al concreto, y reducen el fenómeno de fisuración, dando como resultado pavimentos que cumplan con el nivel de servicio durante su vida útil. Además, son una opción con la que se ahorra tiempo en construcción y son más económicas que las losas de concreto armado convencionales.

1.1.1. Problema general

¿Cómo influye la adición de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos?

1.1.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de fibra?
- b) ¿Cuál es el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de fibra?

1.2. Objetivo de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Analizar la influencia de la adición de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos, en base a los resultados de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, para disponer de información organizada y comparativa del uso de fibras.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Analizar el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de la fibra.
- b) Analizar el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de la fibra.

1.3. Justificación e importancia de la investigación

La resistencia a flexión del concreto en el diseño de pavimentos rígidos, es la propiedad más importante para controlar la formación de fisuras y grietas que atenta contra su estética, serviciabilidad y seguridad. Por lo que se plantea la incorporación de fibras al concreto, para incrementar su resistencia a flexión y reducir la formación de fisuras en los pavimentos rígidos, con resultados más ventajosos comparado con la alternativa tradicional del concreto reforzado con malla de acero.

La investigación contribuirá en realizar un análisis de los efectos de la incorporación de las fibras de acero y fibras de polipropileno en la resistencia a flexión del concreto, mediante un análisis estadístico de los resultados de múltiples investigaciones nacionales e internacionales, el cual permitirá cuantificar la mejora alcanzada de la resistencia a flexión y la dosificación óptima de fibra, dentro de intervalos confiables. Además, las conclusiones de esta investigación servirán como guía a estudiantes e ingenieros en el diseño de pavimentos de concreto.

1.4. Limitaciones del estudio

La presente tesis no realiza ningún ensayo experimental, se ha obtenido resultados del ensayo de resistencia a flexión (módulo de rotura) del concreto reforzado con fibras de acero y fibras de polipropileno de 31 investigaciones nacionales y 13 investigaciones internacionales para su tratamiento estadístico.

Esta investigación asumirá que los resultados obtenidos de las diversas investigaciones consultadas, se han realizado con el adecuado control de calidad y con equipos de laboratorio calibrados.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco histórico

La tecnología de concretos reforzados con fibras (Fiber Reinforced Concrete) se está generalizando en el mundo de la construcción a escala internacional. Se ha aplicado en la construcción de pisos industriales, pavimentos, concreto proyectado para túneles y taludes, elementos de concreto prefabricado, entre otras aplicaciones.

Sin embargo, no se trata de una nueva técnica en el mundo de la construcción, según Vidaud, Frómeta, & Vidaud (2015) las fibras naturales se utilizaron desde tiempos muy antiguos, tales como: hilo, paja, e inclusive pelos de animales como el de los caballos, que eran agregados al mortero y adobe para controlar la fisuración e incrementar la resistencia a tensión. Posteriormente, hacia el año 1900 se volvió popular el uso de fibras de asbesto, incorporadas en la matriz de la pasta de cemento, aunque años después se reveló que tiene efectos dañinos en la salud humana (p.31).

Según Sotil & Zegarra (2015) hasta el año 1935 se hizo uso de fibras naturales, iniciando el uso de las fibras sintéticas, que fueron conocidas a fines del siglo XIX gracias a la marca Chardonnet por inventar la seda artificial y en 1935 por la producción de la primera fibra de nylon. Sin embargo, su uso era exclusivamente en la industria textil, estas fibras se implementaron en la industria de la construcción muchos años después (p.39-40).

Según Vidaud, Frómeta, & Vidaud (2015) desde 1950 el cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano fueron los que dieron inicio a las investigaciones sobre el concreto reforzado con fibras de diferentes materiales como acero y sintéticos, ellos tenían un gran interés en encontrar un material que mejore la resistencia del concreto, para ser utilizado en la construcción de instalaciones militares en zonas de conflicto. Durante los años 50 y 60, se desarrollaron diferentes investigaciones sobre el concreto reforzado con fibras de acero, entre ellas destacaron los estudios de Romualdi y Wiliamson, quienes aseguraban que su incorporación a la mezcla del concreto generaba una red de pequeñas armaduras que incrementaban la resistencia a tensión y la tenacidad del concreto.

A fines del año 1950 se usó las primeras fibras de vidrio en la antigua Unión Soviética, con la finalidad de reducir el espesor de los elementos de concreto. En un principio las fibras de vidrio no tuvieron éxito porque eran destruidas por los álcalis del cemento portland, por lo que posteriormente se desarrollaron fibras de vidrio resistentes a la reacción álcalis-agregado. Asimismo, en los años 60 iniciaron los estudios sobre el concreto reforzado con fibras de polipropileno, la cual fue considerada por la División de Desarrollo de la Armada de los Estados Unidos como el material sintético más apropiado para el concreto debido a su buen desempeño y ser una opción más económica (p.31-34).

Según Sotil & Zegarra (2015) G. Constantinesco registró una patente en Estados Unidos en 1954, utilizando fibras helicoidales y espirales para aumentar la resistencia a la fisuración del concreto. Posteriormente en 1970, en diferentes países europeos, sobre todo en España, se comenzó a usar las fibras de acero en proyectos de pisos industriales, revestimiento de túneles y pavimentación de tableros de puentes (p.40).

Actualmente muchas investigaciones por todo el mundo respaldan que las fibras actúan como refuerzo en el concreto, mejorando sus propiedades de resistencia a flexión, ductilidad y tenacidad; y además controlando la formación de fisuras.

2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

La presente investigación se va a desarrollar en base a los resultados de 31 investigaciones nacionales y 13 investigaciones internacionales sobre el efecto de la adición de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto para pavimentos rígidos.

2.2.1. Investigaciones nacionales

Carrillo & Rojas (2017) en su trabajo de investigación presenta un análisis comparativo entre las propiedades mecánicas de un concreto patrón $f'c = 210$ kg/cm² y un concreto con fibras de acero Dramix 3D en dosificaciones de 1, 2, 3 y 4% respecto al volumen del agregado fino equivalentes a dosificaciones de 7, 14, 21 y 28 kg/m³ del peso total del concreto respectivamente. La resistencia a flexión se evaluó a los 7, 14 y 28 días, en los resultados a los 28

días se pudo observar que el concreto sin fibras tiene una resistencia de 46.42 kg/cm², el mismo que se incrementa hasta 56.67 kg/cm² al incorporar las fibras de acero con una dosificación de 21 kg/m³.

Flores & Mamani (2018) en su trabajo de investigación presenta la evaluación de un concreto patrón $f'c= 210$ kg/cm², un concreto con fibra metálica Sika Fiber CHO 65-35-NB y un concreto con fibra de polipropileno Sika Fiber Force PP-48, para determinar cuál tiene mejor resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y costos. La fibra metálica se incorporó en dosificaciones de 20, 30, 40 y 50 kg/m³, y las fibras de polipropileno, en dosificaciones de 2 kg/m³, 5 kg/m³, 7 kg/m³ y 9 kg/m³ respecto al peso total del concreto. En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de 26.64 kg/cm², el cual incrementa hasta 34.64 kg/cm² al incorporar las fibras metálicas con una dosificación de 50 kg/m³; y respecto a la fibra de polipropileno incrementa a 32.85 kg/cm² con una dosificación de 9 kg/m³.

Chilón (2018) en su trabajo de investigación tuvo como finalidad determinar el comportamiento mecánico de un concreto autocompactante con resistencia de diseño $f'c=280$ kg/cm², al añadirle fibras de polipropileno SikaFiber Force PP-48. Se consideró un concreto patrón y concretos con fibras con dosificaciones de 2, 3 y 4 kg/m³ respecto al peso total del concreto, ensayadas a compresión, flexión y tracción indirecta a los 7, 14 y 28 días. Los resultados de resistencia a flexión manifiestan que el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de 56.59 kg/cm², la cual incremento hasta 60.51 kg/cm² al incorporar las fibras de polipropileno en una dosificación de 2 kg/m³. El autor concluye que la adición de fibras tiene una dosificación óptima y mayor a ello genera una disminución en las propiedades mecánicas del concreto.

2.2.2. Investigaciones internacionales

Rodríguez & Segura (2013) en su trabajo de investigación tuvo como finalidad conocer y comparar el comportamiento del concreto reforzado con distintos tipos de fibras a ensayos de flexo-tracción y compresión, para ello consideraron un concreto patrón comparado con muestras de concreto con adición de fibras de acero, Dramix RC-65/35-BN y Dramix RC-80/35-BN, con una dosificación para la primera de 20 y 15 kg/m³ y para la segunda de 20 y 25 kg/m³ respecto al peso total del concreto; y muestras de concreto con adición de fibras de polipropileno, ENDURO 600 Propex y SikaFiber M-48, con una dosificación para ambas de 5 y 4 Kg/m³ respecto al peso total del concreto. En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de 48.54 kg/cm², al incorporar las fibras metálicas, en ambas marcas de fibra disminuyó la resistencia, hasta el valor de 44.05 kg/cm² con la fibra Dramix RC-65/35-BN con una dosificación de 15 kg/m³; por otro lado, al incorporar las fibras de polipropileno ENDURO 600 la resistencia incremento a 55.47 kg/cm² con una dosificación de 4 kg/m³.

Meza (2015) en su trabajo de investigación tuvo como finalidad evaluar los parámetros de resistencia a flexión, tenacidad a flexión, resistencia residual a flexión y energía de fractura de concretos reforzados con fibras de acero y polipropileno, comparados con un concreto sin refuerzo utilizado para pisos industriales de 40 MPa de resistencia a flexión. Las muestras de concreto reforzado fueron con 5 diferentes fibras de acero y 4 de polipropileno, ensayadas a flexión a los 28 días. Los resultados de resistencia a flexión manifiestan que el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de 44.48 kg/cm², al incorporar las fibras metálicas, se obtuvo un incremento de la resistencia hasta el valor de 49.65 kg/cm² con la fibra Dramix con una dosificación de 28 kg/m³; por otro lado, al incorporar las fibras de polipropileno MacMatrix, la resistencia disminuyó a 44.31 kg/cm² con una dosificación de 3 kg/m³.

Ramírez & Samaniego (2016) en su trabajo de investigación presenta un estudio comparativo sobre los efectos de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero DRAMIX RC 65/35 NB en dosificaciones de 15, 20 y 25 kg/m³ y macrofibras de polipropileno TUF-STRAND SF en dosificaciones de 4, 6 y 8 kg/m³, respecto a un concreto patrón $f'_c = 245$ kg/cm². En los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, el concreto sin fibras obtuvo una resistencia de 28.65 kg/cm², al incorporar las fibras de acero, se obtuvo una máxima resistencia de 38.34 kg/cm² con una dosificación de 20 kg/m³; por otro lado, al incorporar las macrofibras de polipropileno se obtuvo una máxima resistencia de 32.33 kg/cm² con una dosificación de 8 kg/m³.

Los antecedentes mencionados anteriormente representan tan solo una muestra de las múltiples investigaciones experimentales que se han realizado para el cálculo de la resistencia a flexión del concreto, en ellas se observa que existe variaciones en los resultados obtenidos de la resistencia a flexión del concreto tanto con fibras de acero como con fibras de polipropileno; esto se debe a que existen diferentes variables de diseño, tales como el tipo de fibra utilizado, la marca de fibra, las dosificaciones de fibra, la relación agua-cemento, los tipos de agregados, el uso de aditivos, entre otros. Los resultados obtenidos por cada investigador son válidos en el lugar de estudio, sin embargo, no puede calcularse una resistencia a la flexión del concreto basado solo en alguna de estas investigaciones. Por lo que, para calcular un intervalo confiable que represente el resultado de la resistencia a flexión del concreto, esta tesis de investigación hace un tratamiento estadístico de los resultados obtenidos de las 31 investigaciones nacionales y 13 investigaciones internacionales consultadas, el cual es desarrollado en el Capítulo VII.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Pavimentos

Montejo (2002) define el pavimento como una estructura, conformada por capas superpuestas, que está apoyada sobre el suelo de cimentación o llamado también subrasante. Esta estructura tiene la función de soportar adecuadamente los esfuerzos generados por las cargas repetidas del tránsito, durante el período para el que fue diseñado (p.1).

2.3.1.1. Tipos de pavimentos

a. Pavimentos flexibles

Montejo (2002) describe estos pavimentos, como formados por una carpeta de mezcla bituminosa (asfalto) que va apoyada sobre dos capas de materiales no rígidos, llamados base y subbase. En algunos casos, puede no llevar alguna de estas capas, ello depende de las necesidades particulares del proyecto.

En los pavimentos flexibles, la carpeta de rodadura tiene menos rigidez por lo que se deforma más y transmite tensiones mayores en la subrasante. La carpeta de rodadura no absorbe todas las cargas de los vehículos, actúa más como un transmisor, distribuyendo la carga desde la carpeta de rodadura hasta que llegue a un nivel aceptable para la subrasante (p.2-4). La estructura del pavimento flexible o asfáltico se puede apreciar en la Figura N° 1.

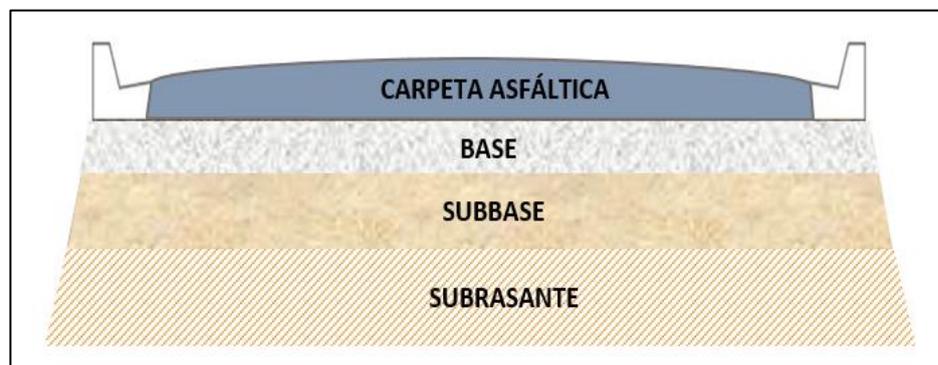


Figura N° 1: Estructura de un pavimento flexible

Fuente: Elaboración propia

b. Pavimentos semi-rígidos

Para Montejo (2002) estos pavimentos son similares al pavimento flexible, pero la base o sub-base se ha rigidizado artificialmente con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cemento, cal o químicos. Estos aditivos corrigen o modifican las propiedades mecánicas de los materiales locales para la construcción de la base y sub-base, siendo esta solución más económica que el trasladar los materiales adecuados desde otro lugar distante.

c. Pavimentos rígidos

El pavimento rígido está constituido por una losa de concreto, que va apoyada sobre la subrasante, o de ser necesario, sobre una sub-base de material seleccionado (ver en la Figura N° 2). La losa de concreto tiene una alta rigidez y un alto módulo de elasticidad por lo que esta capa absorbe gran parte de los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares, además las cargas se distribuyen en una zona muy amplia del pavimento, generando tensiones muy bajas en la subrasante. El diseño del espesor de la losa de concreto se encarga de dar la resistencia estructural a las cargas actuantes, mientras que el espesor de la sub base y subrasante son diseñados para evitar los asentamientos diferenciales de la losa de concreto (p.5).

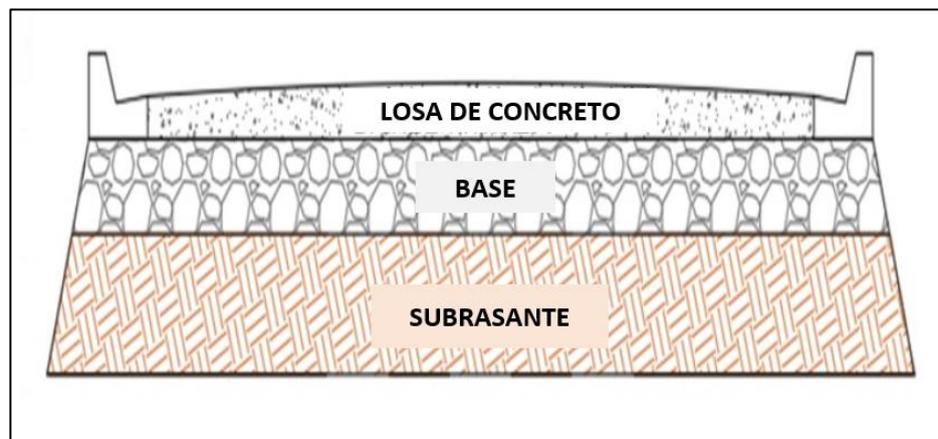


Figura N° 2: Estructura de un pavimento rígido

Fuente: Elaboración propia

d. Pavimentos articulados

La capa de rodadura de estos pavimentos está formada por bloques de concreto prefabricado de igual espesor, llamados adoquines. Los adoquines se colocan sobre una capa de arena, la cual se apoya sobre la subrasante; si la subrasante no tiene la suficiente capacidad para resistir la magnitud de las cargas y su frecuencia, será necesario la colocación de una base granular previa (p.7).

2.3.1.2. Factores que influyen en la performance de los pavimentos

De la Cruz y Quispe (2014) describen los factores que influyen en la performance de los pavimentos, tales como:

- a. Tráfico: Los factores que influyen son la carga bruta y presión de llanta, las propiedades del terreno de fundación y los materiales del pavimento, la repetición de carga, el radio de influencia de carga, la velocidad directriz, el tipo de eje y la configuración de rueda.
- b. Clima: Los factores que influyen son la lluvia (que pueden producir el fenómeno de Aquaplaning), la expansión por congelamiento, la contracción y expansión por temperatura, los efectos de congelamiento-deshielo por gradiente de temperatura y la variación de clima húmedo-seco.
- c. Geometría del proyecto (Diseño Vial): Los factores que influyen son la distribución de tráfico en el pavimento, la posición de la estructura, las secciones de corte y relleno, la profundidad del nivel freático, los deslizamientos y problemas relacionados.
- d. Construcción y mantenimiento: Los factores que influyen son la deficiencia en la compactación del terreno de fundación, las fallas por una mala instalación de juntas, mala colocación de guías en los niveles (reglas metálicas), escarificado y eliminación de materiales superiores al especificado, y la durabilidad del agregado partido.

2.3.1.3. Exigencias técnicas para la construcción de pavimentos

Para la construcción de un determinado tipo de pavimento, se debe considerar los requisitos establecidos en la Norma C.E.0.10: Pavimentos Urbanos. Esta norma tiene como objetivo la seguridad pública y técnica de la estructura a ejecutar, estableciendo los parámetros para un buen diseño. En el caso de los pavimentos establece parámetros de resistencia del concreto, resistencia del suelo, entre otros (ver la Tabla N° 1). El cumplimiento de los parámetros ofrece que la estructura del pavimento desarrolle un desempeño mecánico adecuado y que las posibles fallas en el pavimento se minimicen.

Tabla N° 1: Especificaciones técnicas de pavimentos

ELEMENTO	TIPO DE PAVIMENTO			
	FLEXIBLE	RÍGIDO	ADOQUINES	
Sub-rasante	95% de compactación: Suelos Granulares - Proctor Modificado Suelos Cohesivos - Proctor Estándar			
	Espesor compactado: ≥ 250 mm - Vías locales y colectoras ≥ 300 mm - Vías arteriales y expresas			
Sub-base	CBR ≥ 40% 100% Compactación Proctor Modificado		CBR ≥ 30% 100% compactación Proctor Modificado	
Base	CBR ≥ 80% 100% Compactación Proctor Modificado	N.A.*	CBR ≥ 80% 100% Compactación Proctor Modificado	
Imprimación/capa de apoyo	Penetración de la Imprimación ≥ 5 mm	N.A.*	Cama de arena fina, de espesor comprendido entre 25 y 40 mm	
Espesor de la capa de rodadura	Vías locales	≥ 50 mm	≥ 60 mm	
	Vías colectoras	≥ 60 mm	≥ 80 mm	
	Vías arteriales	≥ 70 mm	N.R.*	
	Vías expresas	≥ 80 mm	N.R.*	
Material	Vías locales			
	Vías colectoras	Concreto asfáltico***	M.R. ≥ 3.4 Mpa (34 Kg/cm ²)	
	Vías arteriales			f'c ≥ 38 Mpa (380 Kg/cm ²)
	Vías expresas			

Notas: *N.A.: No aplicable, **N.R.: No Recomendable, *** El concreto asfáltico debe ser hecho preferentemente con mezcla en caliente. Donde el Proyecto considere mezclas en frío, estas deben ser hechas con asfalto emulsificado.

Fuente: SENCICO, (2010)

2.3.2. Pavimento rígido o hidráulico

Según el Montejo (2002) los pavimentos hidráulicos reciben el nombre de pavimentos rígidos porque están conformados por una losa de concreto, un material que es conocido por su rigidez. Debido a ello, la losa de concreto absorbe casi todos los esfuerzos producidos por las repeticiones de las cargas de tránsito, transmitiendo solo una pequeña parte de estos esfuerzos a las capas inferiores, a la base o subbase y a la subrasante (p.5).

2.3.2.1. Tipos de pavimentos rígidos

a. Pavimentos de concreto hidráulico simple

Según Becerra (2012) este tipo de pavimentos rígidos no contienen armadura de acero en la losa de concreto y requieren de juntas longitudinales y transversales con un espaciamiento recomendable de corta longitud entre 3.50 a 6.00 m para controlar el agrietamiento, estas juntas pueden tener elementos de transferencia de carga que son pequeñas varillas de acero, conocidos como pasadores o dowels (p.35).

b. Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo de acero

La carpeta de rodadura de este tipo de pavimento esta reforzado con una malla de acero y con varillas de acero en las juntas para garantizar la transferencia de carga entre losas (pasadores). La malla permite ampliar el espaciamiento entre juntas transversales, además también tiene la función de controlar la formación de fisuras dentro de los paños (p.36).

c. Pavimentos de concreto hidráulico con refuerzo continuo

La losa de concreto de este pavimento rígido tiene un refuerzo continuo en dirección longitudinal, diseñado para que no sea necesaria el uso de juntas de contracción, la aparición de fisuras transversales es común a intervalos muy cortos, pero son controladas y se mantienen unidas por medio del acero de refuerzo (p.36).

d. Pavimentos de concreto hidráulico reforzado con fibras

La losa de concreto de este tipo de pavimento esta reforzado por fibras, las cuales son incorporadas dentro de la mezcla de concreto, estas pueden ser de diferentes tipos de material tales como metálicos o sintéticos. Las fibras tienen la función de mejorar el comportamiento de las propiedades mecánicas del concreto y controlar la formación de fisuras en el pavimento.

En la Figura N° 3 se puede ver los diferentes tipos de pavimentos rígidos o hidráulicos:

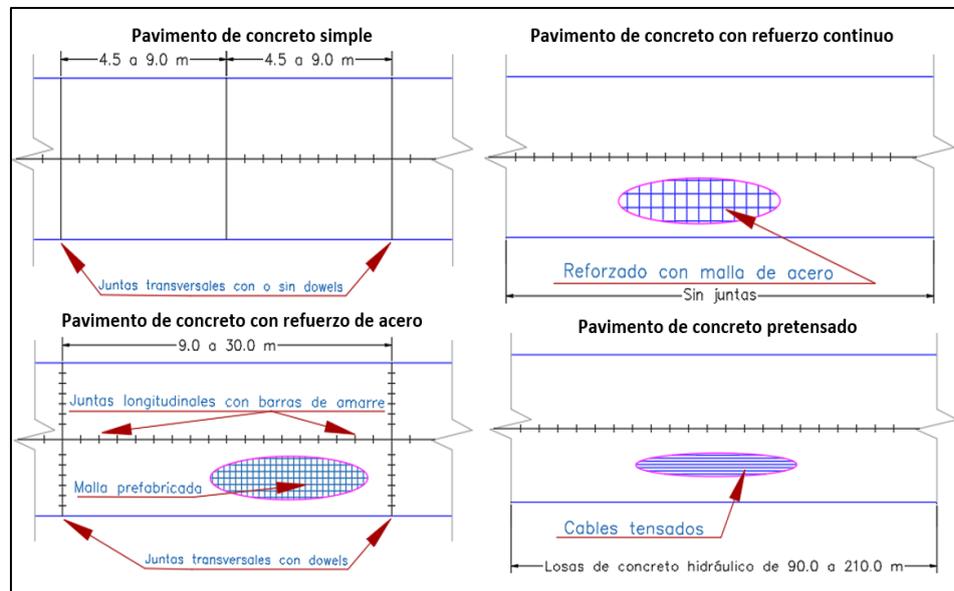


Figura N° 3: Tipos de pavimentos rígidos

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.2. Componentes estructurales del pavimento rígido

Para Montalvo (2015) el pavimento está formado por un conjunto de componentes (ver la Figura N° 4) que permiten el adecuado funcionamiento mecánico de la estructura; transfiriendo las cargas de la superficie hacia las capas inferiores de la estructura del pavimento, siendo los siguientes:

a. Losa de concreto

La losa de concreto es la capa superior del pavimento rígido, donde los esfuerzos se distribuyen de acuerdo a la rigidez de la losa, haciendo que se transmita solo una pequeña parte de los esfuerzos a las capas inferiores, base o subbase y a la subrasante (p.31).

b. Base o Subbase

La base o subbase de un pavimento rígido soporta solo una pequeña parte de los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares. Por otro lado, estas capas pueden funcionar también como drenaje para proteger la estructura superior, controlando el ascenso del agua (p.31).

c. Subrasante

La subrasante es la capa de suelo natural donde se apoya el pavimento. Su objetivo es dar la estabilidad requerida al pavimento; además el diseño del pavimento inicia por la subrasante ya que es el suelo de soporte de toda la estructura del pavimento (p.31-32).

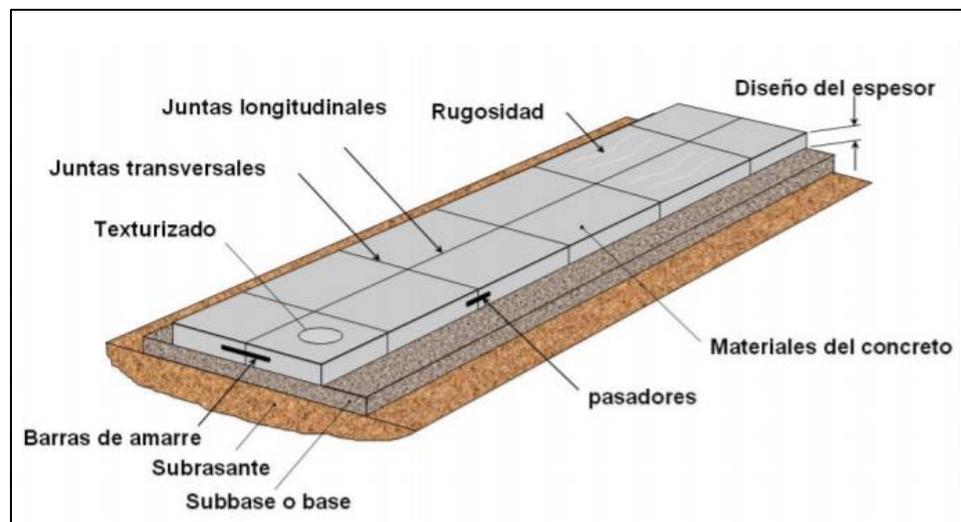


Figura N° 4: Partes del pavimento rígido

Fuente: Becerra, (2012)

2.3.2.3. Materiales del pavimento rígido

a. Concreto hidráulico

Según Sánchez (2001) el concreto es una mezcla formada por proporciones adecuadas de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, con un comportamiento plástico y moldeable antes de su fraguado, y que al fraguar toma una consistencia rígida, con propiedades aislantes y resistentes a grandes esfuerzos, ideal para la construcción (p.19).

b. Componentes del concreto hidráulico

- Cemento

El cemento portland hidráulico es un material de caliza pulverizada con propiedades adhesivas y cohesivas, que permite aglutinar los agregados para fabricar el concreto. Además, el cemento se denomina hidráulico porque fragua y endurece al reaccionar químicamente con el agua (p.27).

El cemento portland se clasifica en 05 tipos:

- Tipo I: Cemento de uso normal en obras civiles que no requiere de alguna característica especial.
- Tipo II: Cemento con moderado calor de hidratación y tiene una resistencia moderada a la acción de los sulfatos.
- Tipo III: Cemento de altas resistencias iniciales, usado para estructuras que requieran una rápida puesta de servicio.
- Tipo IV: Cemento con bajo calor de hidratación, usado para la fabricación de concretos masivos.
- Tipo V: Cemento de alta resistencia al ataque de los sulfatos (p.49).

Cada uno de los tipos de cemento Portland indicados deben cumplir con los requisitos físicos y químicos que están establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 334.009: Cementos Portland Requisitos.

- Agregados o áridos

Según Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi (2004) los agregados o áridos usados en la elaboración del concreto son la arena y la grava, provenientes de rocas erosionadas por agentes naturales o por trituración mecánica y tamizados de rocas. Los agregados forman el 60% al 75% del volumen del concreto, por lo que tienen gran influencia en las propiedades mecánicas del concreto fresco y endurecido, en las dosificaciones de la mezcla y en la economía del concreto (p.103).

Los agregados o áridos se clasifican en:

- Agregado fino

Según Sánchez (2001) los agregados finos como la arena, provienen de la desintegración natural o artificial de las rocas, los cuales pasan el tamiz N° 4 o 4.76 mm y quedan retenidos en el tamiz N° 200 o 74 μm (p.70).

- Agregado grueso

Los agregados gruesos como la grava y piedra chancada o triturada, son provenientes de la desintegración natural o artificial de las rocas, y se considera el material retenido en el tamiz N° 4 o 4.76 mm (p.70).

Las propiedades físicas de los agregados son:

- Granulometría

La granulometría es la distribución de los tamaños o diámetros de las partículas de un agregado. Esta se determina por un análisis granulométrico, que consiste en separar una muestra de agregado en porciones de igual tamaño, para ello se hace uso de una serie de tamices con aberturas cuadradas estandarizadas, por donde pasa el agregado (p.72).

Los agregados deben estar dentro de los límites de gradación que están establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 400.037: Agregados - Especificaciones normalizadas para agregados en concreto (ver la Tabla N° 2 y Tabla N° 3).

Tabla N° 2: Granulometría del agregado fino

Tamiz	Porcentaje que pasa (%)
9.5 mm (3/8 pulg)	100
4.75 mm (No. 4)	95 a 100
2.36 mm (No. 8)	80 a 100
1.18 mm (No.16)	50 a 85
600 µm (No. 30)	25 a 60
300 µm (No. 50)	05 a 30
150 µm (No. 100)	0 a 10

Fuente: INDECOPI, (2014)

Tabla N° 3: Granulometría del agregado grueso

TMN (mm)	PORCENTAJE QUE PASA POR LOS TAMICES NORMALIZADOS												
	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No. 50)
90 a 37.5	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 5						
63 a 37.5		100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5						
50 a 25			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
50 a 4.75			100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5			
37.5 a 19				100	90 a 100	20 a 55	0 a 5		0 a 5				
37.5 a 4.75				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5			
25 a 12.5					100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5				
25 a 9.5					100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5			
25 a 4.75					100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5		
19 a 9.5						100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5			
19 a 4.75						100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5		
12.5 a 4.75							100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5		
9.5 a 2.36								100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	
12.5 a 9.5								100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
4.75 a 1.18									100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Fuente: INDECOPI, (2014)

— Curva granulométrica

Según Sánchez (2001) la curva granulométrica es la representación gráfica del resultado del análisis granulométrico. En esta gráfica, el eje vertical con escala aritmética, representa el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices; y el eje horizontal con escala logarítmica, representa las aberturas de los tamices (p.75).

– Tamaño máximo (TM)

El tamaño máximo es el mayor tamaño del agregado grueso dentro de la masa. Se determina como la abertura del menor tamiz del conjunto que permite el paso del 100% del material (p.78).

– Tamaño máximo nominal (TMN)

El tamaño máximo nominal es más útil, ya que indica el tamaño promedio de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregado grueso. Se determina como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más del material (p.78).

– Módulo de finura

El módulo de finura se obtiene con la suma de los porcentajes acumulados en los tamices estándares dividido entre 100. Es un factor empírico que hace una evaluación de grados de finura del agregado fino o arena (p.78).

$$MF = \frac{\sum \% \text{Acumulados retenidos } (1\frac{1}{2}^n, \frac{3}{4}^n, \frac{3}{8}^n, N^{\circ}4, N^{\circ}8, N^{\circ}16, N^{\circ}30, N^{\circ}50, N^{\circ}100)}{100}$$

– Densidad

La densidad es la relación del peso respecto al volumen de una masa, se debe tener un cuidado especial al calcular la densidad en el caso de los agregados para el concreto, ya que estos serán influenciados por su permeabilidad interna, el porcentaje de vacíos y agua entre sus partículas (p.95).

– Peso unitario

También se le llama peso volumétrico del agregado y se define como el peso suelto o compactado que alcanza un determinado volumen unitario, esta propiedad se mide en Kg/m³ del material (p.97).

La determinación del peso unitario de los agregados, ya sea compacto o suelto, se efectúa de acuerdo a lo indicado en la Norma Técnica Peruana NTP 400.017.

– Porcentaje de absorción

Es la capacidad de absorción de las partículas del agregado, esta propiedad se calcula por diferencia de pesos, entre el peso saturado superficialmente seco y el peso seco. Se expresa como un porcentaje del peso seco del agregado (p.97).

$$\% \text{ Absorción} = \frac{\text{Peso saturado sup. seco} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

- Agua

Según Sánchez (2001) el agua en la mezcla, hidrata las partículas de cemento y crea una matriz que aglutina a los agregados que se encuentran alrededor. Además, el agua garantiza la adecuada trabajabilidad de la mezcla (p.22).

Debido a la gran importancia del agua dentro de la mezcla de concreto, se tiene que tener en cuenta los límites permisibles de los componentes dañinos en el agua que se especifican en la Norma Técnica Peruana NTP 339.088: Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland.

- Aditivos

Según Sánchez (2001) desde mediados del siglo XX, se viene utilizando aditivos para mejorar algunas propiedades del concreto, estos aditivos se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado, pudiendo concederle propiedades retardantes y acelerantes de fragua, plastificantes, entre otras (p.23).

2.3.2.4. Formación de fisuras por flexión en pavimentos rígidos

En un pavimento rígido, la losa de concreto sometida a cargas externas (vehículos), se generan esfuerzos que se distribuyen en un área grande del suelo (ver la Figura N° 5), con presiones máximas en el punto de aplicación de la carga (rueda del vehículo), que van disminuyendo a medida que se alejan del punto de aplicación de la carga.

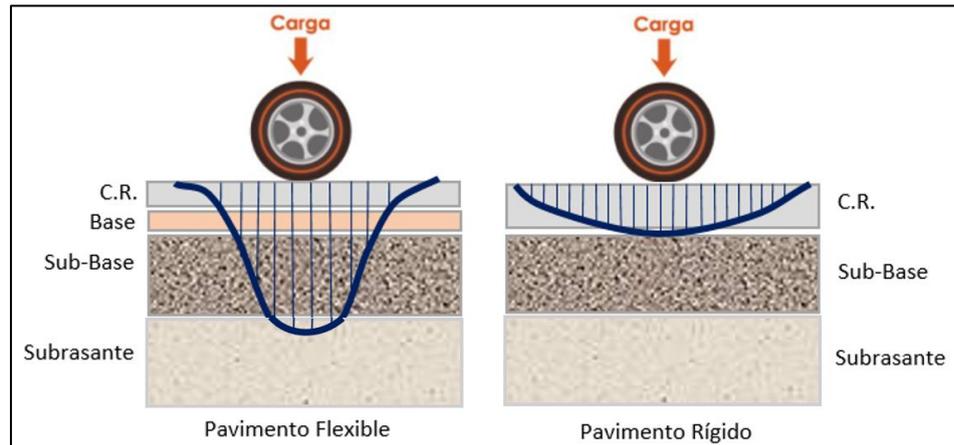


Figura N° 5: Trasmisión de cargas vehiculares al pavimento

Fuente: Elaboración propia

Esta distribución de esfuerzos genera pequeños desplazamientos verticales del pavimento rígido, y proporcionales a la magnitud del esfuerzo actuante. El comportamiento estructural del pavimento rígido puede modelarse como una viga de concreto simplemente apoyada, flexionándose por acción de las cargas vehiculares, tal como se observa en la Figura N° 6.

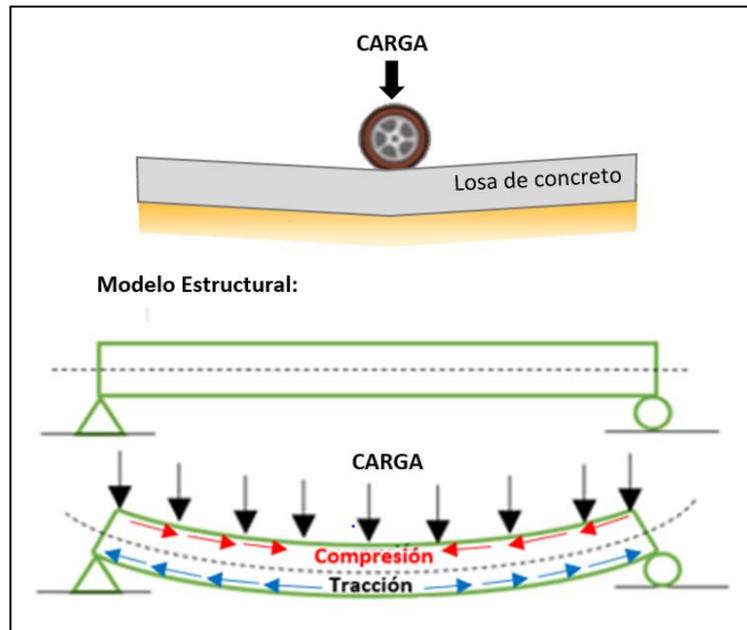


Figura N° 6: Modelo estructural simplificado de un pavimento rígido
 Fuente: Elaboración propia

Si en el modelo estructural cortamos una sección transversal de la losa de concreto del pavimento, asumiendo que está trabajando dentro de un rango elástico, podemos hacer un diagrama simplificado de la distribución de esfuerzos internos de compresión y tracción que se generan en la sección de la losa, como resultado de su deformación por flexión, ver en la Figura N° 7.

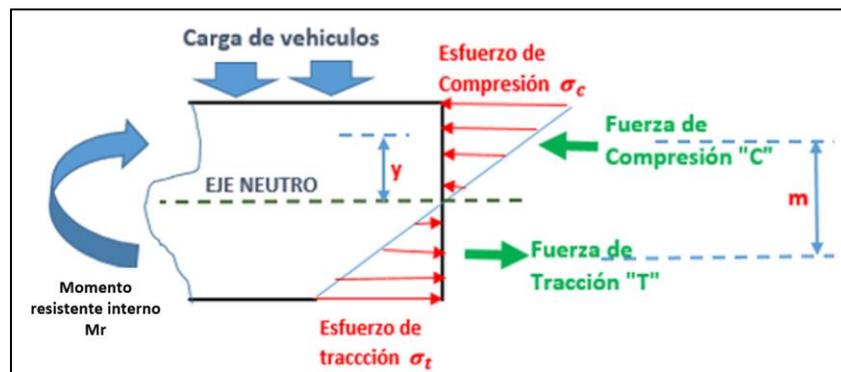


Figura N° 7: Esfuerzos en sección de la losa de concreto en rango elástico
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 7, se observa que las cargas vehiculares sobre el pavimento generan los mayores esfuerzos de compresión en la parte superior de la losa de concreto, los mismos que van disminuyendo a medida que vamos bajando, hasta que el esfuerzo se vuelve nulo en una

línea imaginaria denominada “eje neutro”, en el caso de un pavimento su sección es rectangular, por lo que el eje neutro pasa por la mitad del peralte de la losa de concreto. A medida que seguimos bajando, los esfuerzos se convierten en esfuerzos de tracción, haciéndose máximos en la parte más inferior de la losa de concreto.

Dentro de la clasificación de fisuras originadas en el estado endurecido, están las fisuras producidas por cargas que originan esfuerzos de flexión. Es de conocimiento que el concreto tiene una buena resistencia a los esfuerzos de compresión; pero es un material frágil a la tracción, es decir que tiene una baja resistencia a la tracción. Por lo que mientras los esfuerzos de tracción que se generan por la flexión sean menores a la capacidad resistente a flexión del concreto (módulo de rotura), la losa se flexionará y luego retornará a su posición inicial, sin sufrir ningún daño (formación de fisuras).

Sin embargo, el concreto se fisurará si los esfuerzos de tracción por flexión llegan a superar al módulo de rotura del concreto (cargas adicionales no previstas) o por el exceso de cargas repetitivas de los vehículos (fisuras originadas por fatiga). Como los máximos esfuerzos de tracción están en las capas inferiores de la losa de concreto, entonces la fisura iniciará en la base de la losa y se propagará según se observa en la Figura N° 8.

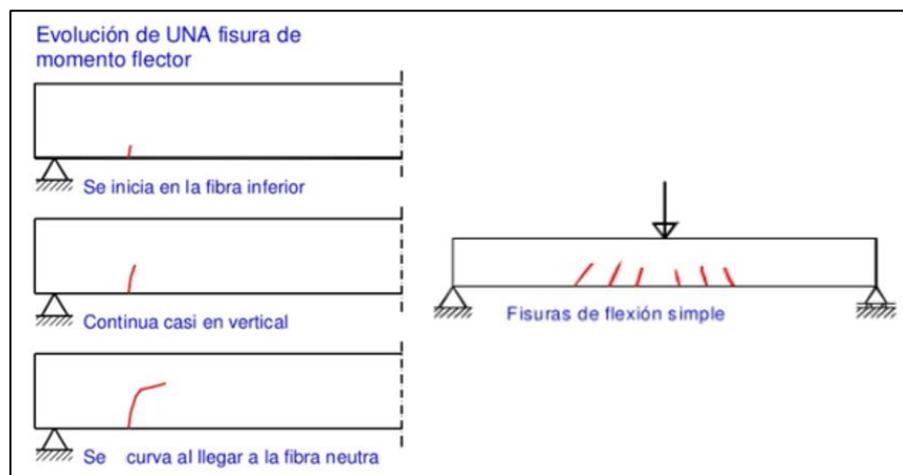


Figura N° 8: Formación y propagación de fisuras por esfuerzos de flexión.

Fuente: Pérez, (2015)

Las fisuras originadas por esfuerzos a flexión se diferencian por tener mayor profundidad y aparecer de forma típica, por lo que es importante comprobar sus dimensiones y progresión de la fisura para determinar si constituyen un problema estructural en el pavimento rígido.

Es muy importante identificar las causas que originan las fisuras y grietas, patologías muy significativas en las obras de concreto, ya que permite a proyectistas y constructores que puedan plantear medidas preventivas para eliminar o disminuir su aparición.

2.3.2.5. Factores de diseño del pavimento rígido

Los métodos de diseño para los pavimentos rígidos o de concreto más utilizados son los propuestos por AASHTO en 1993 y por Portland Cement Association (PCA) en 1984.

SENCICO (2010) sugiere el método PCA para el diseño estructural de pavimentos urbanos de concreto de cemento portland, este método determina el espesor de pavimentos de concreto simple y reforzado con mallas. El Método de diseño PCA considera dos criterios de falla de un pavimento para su diseño:

- Criterio de erosión: Los pavimentos con altos volúmenes de tráfico muestran fallas por bombeo y erosión de la sub-rasante o sub-base, debido al elevado número de cargas pesadas o cerca de las juntas o bordes del pavimento.
- Criterio de fatiga por flexión del pavimento: Esta falla ocurre por el exceso de cargas repetidas que producen esfuerzos de pandeo en el pavimento, resultando eventualmente en el agrietamiento por fatiga. Este criterio controla el diseño de pavimentos de la metodología PCA

Los factores más importantes que se deberán tomar en cuenta en el diseño de pavimentos urbanos de concreto para la determinación del espesor de diseño:

- Resistencia a Flexión o Módulo de Rotura del concreto (MR)
- Resistencia de la Subrasante (Módulo K)
- Cargas de tránsito
- Período de Diseño
- Sardineles Integrales
- Juntas (p.55).

2.3.2.6. Resistencia a la flexión del concreto (MR)

Según García (2012) el concreto es un material que presenta una resistencia a la tracción baja, representando entre el 10 % al 15% de la resistencia a la compresión ($f'c$). Existen formas de obtener la resistencia a tracción del concreto, según como se aplican las cargas tenemos los ensayos a tracción directa, ensayos a tracción indirecta y los ensayos a flexión.

Según Saludes, Aguado, & Molins (2006) el ensayo a tracción uniaxial o tracción directa es considerado el modo más directo para determinar las propiedades de rotura de materiales frágiles, pero es un ensayo difícil de llevar a cabo, debido a que presenta inconvenientes como, la sujeción de la probeta y la dificultad de asegurar la estabilidad del ensayo. Por lo que se propusieron métodos alternativos, los ensayos indirectos, entre los cuales se tiene el ensayo brasileño, y los ensayos de resistencia a flexión (ver la Figura N° 9).

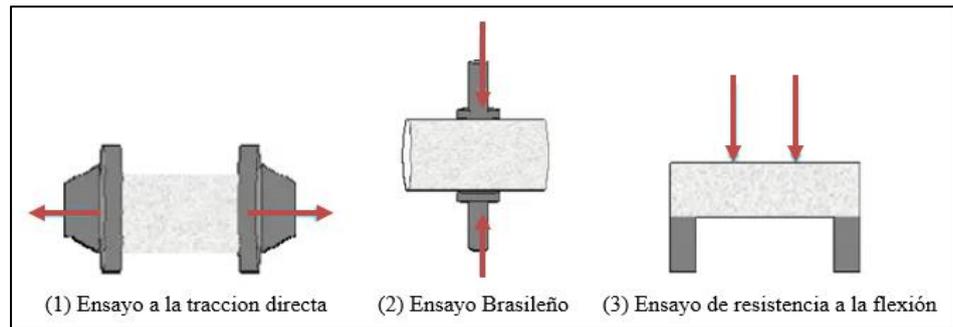


Figura N° 9: Ensayos a tracción directa, indirecta y a flexión del concreto hidráulico
Fuente: García, (2012)

National Ready Mixed Concrete Association (s.f.) define la resistencia a flexión como una medida de la resistencia a la tracción del concreto, definida como la medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto; se expresa como el módulo de rotura (MR) en MPa o Kg/cm². La resistencia a flexión se obtiene aplicando cargas a vigas de concreto con sección transversal cuadrada de 150 x 150 mm y con una longitud que mide tres veces su espesor como mínimo.

SENCICO (2010) indica que la mínima resistencia a la flexión o módulo de rotura del concreto para pavimentos urbanos rígidos de Perú es de 34 Kg/cm² o 3.4 Mpa. Además, menciona que para la determinación del espesor de la losa se debe usar el módulo de rotura promedio a los 28 días.

El módulo de rotura en el diseño de pavimentos rígidos es un factor importante para determinar el espesor de la losa del pavimento rígido, y además permite controlar el agrietamiento del pavimento, originado por el exceso de cargas repetitivas de los vehículos o sobrecargas no previstas.

2.3.2.7. Ensayos de resistencia a la flexión del concreto

Los ensayos de resistencia a flexión, son los más usados para evaluar los concretos reforzados con fibras (FRC). Según Aire, Aguado & Molins (2013) en estos ensayos se emplean generalmente vigas y paneles de sección cuadrada o circular; los cuales permiten determinar la resistencia a la primera fisura, la resistencia a rotura por flexo-tracción y la resistencia residual a flexo-tracción. Además, los ensayos de resistencia a flexión son más sencillos y fiables que los ensayos de tracción directa (p.17).

a. Ensayo a flexión con carga a los tercios de la viga

El ensayo a flexión con cargas a los tercios de la viga está regido por la Norma ASTM C78 y también por la Norma Técnica Peruana NTP 339.078, según INDECOPI (2012) “Este método de ensayo consiste en aplicar una carga en los tercios de la luz de la viga hasta que ocurra la falla. El módulo de rotura se calculará según la ubicación de la falla” (p.2).

El esquema del ensayo a flexión con carga en los tercios de la viga se puede apreciar en la Figura N° 10:

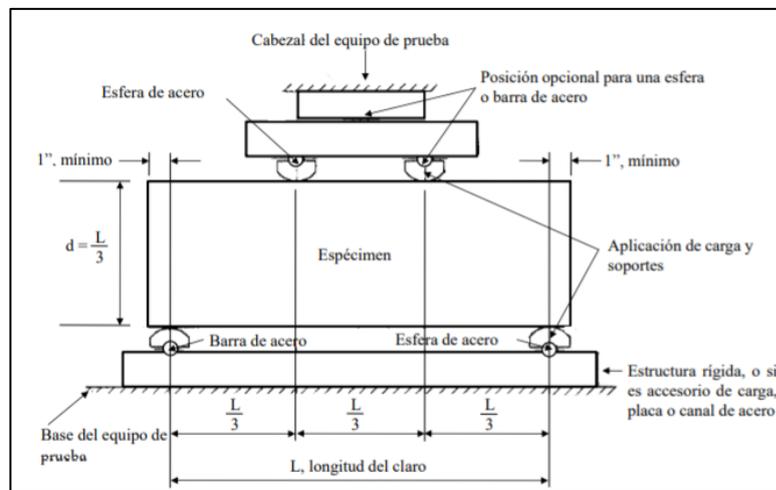


Figura N° 10: Esquema del ensayo a flexión con cargas a los tercios de la viga

Fuente: Aire, Aguado & Molins, (2013)

Para el cálculo del módulo de rotura, INDECOPI (2012) establece:

- Si la falla ocurre dentro del tercio medio de la luz, el módulo de rotura se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$M_r = \frac{PL}{bh^2}$$

- Si la falla ocurre fuera del tercio medio y a una distancia de este no mayor al 5% de la luz libre, el módulo de rotura se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$M_r = \frac{3Pa}{bh^2}$$

- Si la falla ocurre fuera del tercio medio y a una distancia de éste mayor al 5 % de la luz libre, se rechaza el ensayo.

En donde:

- M_r : Módulo de rotura, en MPa.
- P: Carga máxima de rotura indicada por la máquina de ensayo, en N.
- L: Luz libre entre apoyos, en mm.
- a: Distancia promedio entre la línea de falla y el apoyo más cercano, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la viga, en mm.
- B: Ancho promedio de la viga en la sección de falla, en mm.
- H: Altura promedio de la viga en la sección de falla, en mm. (p.7-8).

b. Ensayo a flexión con carga central en la viga

El ensayo a flexión con carga central en la viga está regulado por la Norma ASTM C293 y la Norma Técnica Peruana NTP 339.079.

Según Carrillo & Rojas (2017) este método de ensayo se determina mediante la aplicación de una carga en el centro del tramo de la viga hasta que ocurra la falla (ver la Figura N° 11).

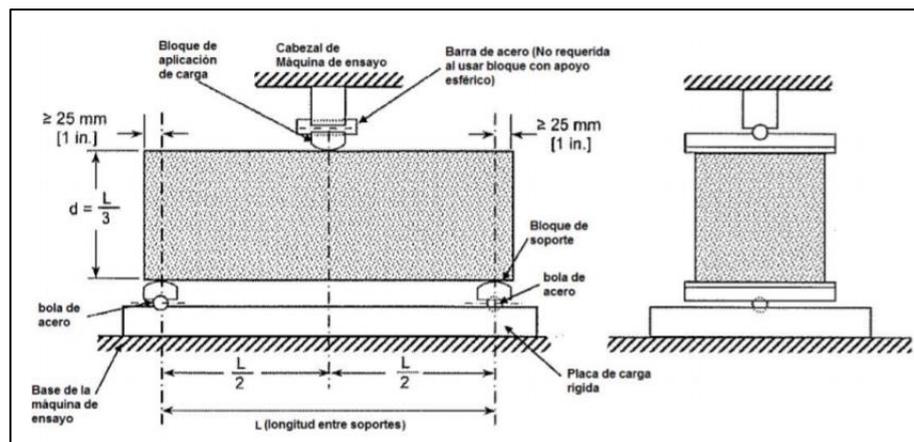


Figura N° 11: Esquema del ensayo a flexión con carga central en la viga

Fuente: Carrillo & Rojas, (2017)

Para el cálculo del módulo de rotura establece que será mediante la siguiente fórmula:

$$M_r = \frac{3PL}{2bh^2}$$

En donde:

- M_r : Módulo de rotura, en MPa o kg/cm²
- P : Carga máxima aplicada, en N o Kg-f
- L : Longitud entre apoyos, mm o cm
- b : Ancho promedio de la viga en la sección de falla, en mm o cm
- h : Altura promedio de la viga en la sección de falla, en mm o cm (p.42)

Según National Ready Mixed Concrete Association (s.f.) el módulo de rotura calculado por el ensayo de la viga cargada en el punto medio es ligeramente mayor, aproximadamente en 15%, que el determinado por el ensayo de la viga cargada en los puntos tercios. El ensayo de viga con carga central es forzado a que suceda la falla cerca del punto de carga mientras que en el ensayo de viga con carga en los puntos tercios es libre de aparecer en cualquier parte del tercio central de la muestra.

Asimismo, menciona algunas desventajas de ambos ensayos, tales como que las vigas son muy pesadas y pueden ser dañadas en su manipulación y transporte. Además, las vigas deben ser curadas según la normativa y ensayadas mientras se encuentren húmedas, ya que si la viga se seca dará como resultado menores resistencias. Hay gran dificultad en el cumplimiento de estos requisitos en el lugar de trabajo por lo que es común obtener resultados del módulo de rotura generalmente bajos y no confiables (p.2).

c. Ensayos de paneles

Los ensayos de paneles, de sección cuadrada o circular, son una alternativa al ensayo de resistencia a la flexión basada en vigas.

- Paneles de sección cuadrada

Según Aire, Aguado, & Molins (2013) existen diferentes configuraciones para el ensayo de panel cuadrado (ver la Figura N° 12), tales como: la medición de la deflexión mediante dispositivos LVDT's y la ejecución del ensayo de paneles por la normativa de la federación europea dedicada a sistemas específicos de concreto (EFNARC).



Figura N° 12: Diferentes configuraciones del ensayo de panel cuadrado

Fuente: Aire, Aguado , & Molins, (2013)

Afirman que el ensayo de panel cuadrado EFNARC mide la deflexión mediante la aplicación de una carga central puntual en un panel de 600 x 600 x 100 mm apoyado simplemente sobre cuatro líneas externas que están sobre en una base plana cuadrada de 500 x 500 mm (elemento fijo). Una de las ventajas de este ensayo es que los resultados presentan una menor dispersión debido a la gran superficie de rotura que se obtiene al ensayar la muestra. Sin embargo, tiene algunos problemas, como conseguir que la muestra tenga una superficie super plana, ello es importante porque en caso de que la muestra no sea plana, no se apoyará uniformemente sobre el elemento fijo, la muestra se deformará de forma impredecible, presentando múltiples picos máximos. Este ensayo no es atractivo desde el punto de vista de control de calidad (p.24).

- Paneles de sección circular

Según Saludes, Aguado, & Molins (2006) el ensayo Round Determinate Panel Test (RDP) es una alternativa al ensayo de panel cuadrado EFNARC. El fin de este método es eliminar las deficiencias en el ensayo de Panel EFNARC. El ensayo RDP consiste en colocar una carga puntual en una muestra circular con 75 mm de espesor y 800 mm de diámetro, la cual está apoyada en 3 puntos situados simétricamente en un diámetro de 750 mm, como se puede observar en la Figura N° 13.



Figura N° 13: Configuración del ensayo de panel circular

Fuente: Saludes, Aguado, & Molins, (2006)

Asimismo, mencionan que la ventaja de este ensayo es el uso de tres puntos de apoyo, lo cual asegura que la distribución de la carga al principio del ensayo esté siempre condicionada en el panel, y permita que los planos de fisuración se encuentren bien definidos, prediciendo de manera más real la distribución de carga. Sin embargo, también tiene desventajas, el RDP es un ensayo de difícil aplicación debido al tamaño y peso final de la muestra, la muestra pesa aproximadamente 90 kg (pp.24-25).

d. Cálculo de la resistencia a flexión mediante correlaciones

Además de los métodos de ensayos a flexión mencionados para obtener el módulo de rotura del concreto, otra forma de calcular el módulo de rotura es a través de correlaciones con los resultados de los ensayos de tracción indirecta y también correlaciones con la resistencia a compresión, según National Ready Mixed Concrete Association (s.f.) “El módulo de rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, dependiendo del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizados” (p.1).

Asimismo, la Tabla N° 4 muestra fórmulas de correlación, según varios autores, que permiten calcular el módulo de rotura (MR) a partir de la resistencia a compresión ($f'c$) de las muestras ensayadas.

Tabla N° 4: Fórmulas de correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión

Fuente	Relación del Mr y f'c
ACI (ACI - 318)	$Mr = 0.62 \sqrt{f'c}$
IS: 456 - 2000	$Mr = 0.7 \sqrt{f'c}$
EC - 02	$Mr = 0.201 f'c$
Javier Llorach Vargas	$Mr = (10\% - 20\%) f'c$
PCA	$Mr = (12\% - 17\%) f'c$
Empresas Duravía	$Mr = (10\% - 15\%) f'c$

Fuente: Ramos, (2019)

2.3.3. Concreto reforzado con fibras (CRF)

Según Vidaud, Frómeta, & Vidaud (2015) a diferencia del concreto simple, el concreto reforzado con fibras soporta no solo los esfuerzos a compresión, también los esfuerzos a tensión, flexión y cortante. Las fibras se distribuyen homogéneamente dentro de la mezcla de concreto, formando una micro-armadura que permite controlar y reducir la formación de fisuras. Además, proporcionan un refuerzo mucho más isótropo, es decir que las fibras actúan en todas las direcciones (refuerzo tridimensional), a diferencia del concreto con refuerzo convencional, donde la armadura de acero colabora solo en una

o dos direcciones. Finalmente, las fibras confieren al concreto una ductilidad, la cual incrementa con una mayor resistencia y cantidad de fibras; y por consiguiente incrementa también la tenacidad en el concreto (p.34).

Según ACI Committee 544 (2002) “El concreto reforzado con fibra (FRC) está hecho principalmente de cemento hidráulico, agregados y fibras de refuerzo discontinuas. Las fibras adecuadas para el concreto armado se han producido a partir de acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas)” (p.1).

2.3.3.1. Tipos de fibras

Según Sika Perú (2011) las fibras usadas en el concreto se clasifican en general según el tipo de material y la funcionalidad de la fibra:

a. Por material:

- Fibras metálicas

Son secciones discretas metálicas elaboradas a base de acero, mayormente tienen con un bajo contenido de carbono; las cuales tienen una esbeltez, relación entre la longitud y el diámetro, desde 20 hasta 100.

- Fibras sintéticas:

Las fibras sintéticas son fabricadas por el hombre, se elaboran en base a acrílico, aramida, carbón, nylon, polipropileno, poliéster y polietileno.

- Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio son secciones discretas, resistentes a los álcalis del cemento portland.

- Fibras naturales

Las fibras naturales son secciones discretas hechas a base de yute, coco, caña de azúcar, madera, yute, bambú, entre otros; sus diámetros se encuentran entre 0.5 y 0.2 mm.

b. Por funcionalidad:

- Microfibras

Las microfibras controlan el fenómeno de fisuración del concreto en estado fresco, las cuales tienen dosificaciones que varían entre 0.03% a 0.15% del volumen de concreto. En este grupo, destaca el uso de las fibras de polipropileno con una dosificación en peso que varía entre 0.3 a 1.2 kg/m³ de concreto, tienen diámetros entre 0.023 mm a 0.050 mm y pueden ser de acuerdo a su tipo de fabricación, monofilamentos o fibriladas.

- Macrofibras

Las macrofibras controlan la fisuración en estado endurecido y de generarse la fisura se encargan de reducir su ancho, logrando un mejor comportamiento de la estructura fisurada. Las dosificaciones varían entre 0.2% a 0.8% del volumen de concreto. En este grupo, las macrofibras más usadas son las fibras sintéticas y metálicas, con diámetros que varían entre 0.05mm a 2.00 mm y una esbeltez (L/d) que varía entre 20 a 100. Específicamente las fibras de acero requieren dosificaciones en peso entre 20 y 50 kg/m³ y las fibras sintéticas (polipropileno) entre 2 a 9 kg/m³ (p.7-11).

En la Tabla N° 5 se observa un resumen de las diferencias entre el grupo de macrofibras y microfibras:

Tabla N° 5: Características de macrofibras y microfibras

Tipo	Material	Dosificación	Diámetro	Función
Macrofibra	Fibras metálicas, sintéticas, o naturales (coco, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc).	Entre 0.2% a 0.8% del volumen del concreto	Entre 0.05 mm y 2.00 mm. Relación de aspecto (Longitud / Diámetro) de entre 20 y 100.	<ul style="list-style-type: none"> * Evitar la fisuración del concreto en estado endurecido. * Reducir la abertura de la fisura. * Garantizar el adecuado desempeño del elemento fisurado.
Microfibra	Las más frecuentes son las fibras de polipropileno; aunque también las hay de aramida, acrílicas, nylon, carbón.	Entre 0.03% a 0.15% del volumen del concreto	Entre 0.023 mm y 0.05 mm, pueden ser monofilamento o fibriladas. Las macrofibras al tener diámetros tan pequeños se califican con el parámetro de Denier (*).	<ul style="list-style-type: none"> * Evitar la fisuración del concreto en estado fresco (ej. Contracción plástica)

(*) Denier es la unidad de medida del sistema anglosajón utilizada para medir la masa lineal de una fibra; se define como el peso en gramos de 9000 metros de una sola fibra. En general, se considera como microfibra, si tiene 1 Denier o menos.

Fuente: Vidaud, Frómata, & Vidaud, (2015)

2.3.3.2. Fibras de acero

ACI Committee 544 (2002) define las fibras de acero como fibras de longitudes cortas que tienen una esbeltez (longitud/diámetro) entre 20 a 100 y son de secciones transversales variadas; estas fibras se distribuyen aleatoriamente en la mezcla de concreto utilizando los procedimientos convencionales de mezcla (p.8).

Sotil & Zegarra (2015) afirman que las fibras de acero son un refuerzo primario del concreto, ya que tienen un elevado módulo de elasticidad y a diferencia de otras fibras no solo se limitan al control de fenómeno de fisuración. Su diámetro varía entre 0.25 y 0.80 mm y su longitud entre 10 y 75 mm (p.49).

Según Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi (2004) la norma ASTM A820, la especificación estándar para fibras de acero para concreto reforzado con fibras, clasifica las fibras de acero de acuerdo a su proceso de fabricación en:

- Tipo I: Alambres trefilados en frío, son aquellas fibras de alambre conformadas a frío, y además son las más fáciles de encontrar en el mercado.
- Tipo II: Hojas cortadas, las fibras de acero se cortan de las chapas de acero.
- Tipo III: Extraídas de la fundición, estas fibras resultantes tienen una sección transversal con forma de medialuna.
- Tipo IV: Otras fibras.

2.3.3.3. Fibras de polipropileno

Según Valero (2015) las fibras de polipropileno son un tipo de fibra sintética usado como refuerzo del concreto, se obtienen de polímeros orgánicos disponibles en una variedad de formulaciones. Las fibras de polipropileno son hidrofóbicas, por lo que no absorben agua y a diferencia de las fibras de acero no son corrosivas; también tienen una gran resistencia al ataque de los álcalis del cemento y tienen una baja conductividad térmica. En la Tabla N° 6 se puede apreciar las propiedades de las fibras de polipropileno (p.56).

Tabla N° 6: Propiedades de las fibras de polipropileno

Propiedades de las fibras de polipropileno	
Diámetro equivalente	-
Densidad Relativa	0.90 - 0.91
Resistencia a la tensión (MPa)	140 - 700
Módulo de elasticidad (Mpa)	3500 - 4800
Alargamiento último (%)	15
Temperatura de ignición (°C)	600
Temperatura de fusión, oxidación o descomposición (°C)	165
Absorción de agua	Nula

Fuente: ACI Committee 54, (2002)

Según la Mármol (2010) las fibras de polipropileno de acuerdo a su diámetro pueden ser microfibras o macrofibras. En el caso de las microfibras tienen diámetros menores a 0.30 mm, mientras que las macrofibras tienen diámetros mayores o iguales a 0.30 mm con una longitud que varía de 20 mm a 60 mm y además pueden colaborar estructuralmente en el concreto (p.14). Se puede apreciar las microfibras y macrofibras de polipropileno en la Figura N° 14.

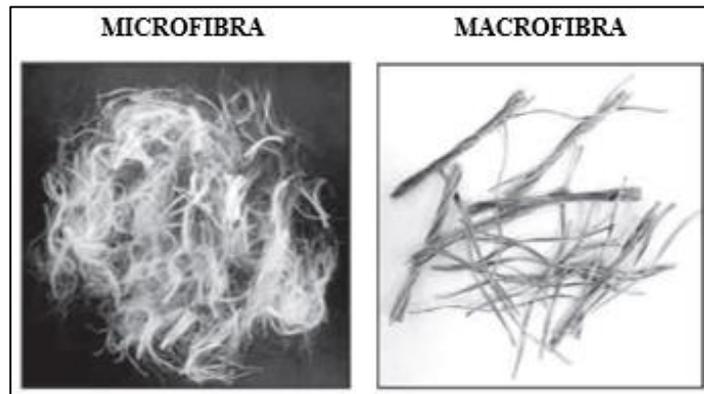


Figura N° 14: Microfibras y macrofibras de polipropileno

Fuente: MACCAFERRI, (2017)

Por otro lado, las fibras de polipropileno según su proceso de fabricación se clasifican en:

- Monofilamentos extruidos:

Según ACI Committee 544 (2002) las fibras de polipropileno en forma de monofilamento son resultado de un proceso de extrusión, que consiste en estirar el material en caliente y es cortado mediante un disco de sección circular, generando una serie de filamentos separados continuos.

- Laminas fibriladas:

Las fibras de polipropileno fibriladas son resultado de un proceso de extrusión cortados por un disco de sección rectangular, se obtienen unas fibras unidas de polipropileno que están tejidas longitudinalmente dentro de cintas de igual ancho, es decir son paquetes de muchas fibras pequeñas; durante el mezclado, por el movimiento de los agregados, los paquetes son separados en paquetes más pequeños o en fibras individuales (p.42).

- Multifilamentos:

Mármol (2010) menciona que las fibras multifilamento se suman a la clasificación, las cuales se generaron como reemplazo de las variedades de fibras monofilamento y están teniendo gran aceptación en el mercado de fibras sintéticas debido a que estas fibras mejoran la adherencia fibra-matriz (p.14).

En la Figura N° 15 se puede apreciar los tipos de fibras de polipropileno:



Figura N° 15: Tipos de fibras de polipropileno

Fuente: Mármol, (2010)

2.3.3.4. Parámetros básicos de las fibras

La función de refuerzo de las fibras y su eficacia para transmitir las tensiones generadas dependen de varios factores, especialmente de las características físicas y mecánicas de las fibras.

- Forma de la fibra

Según Cañette, Eguren, & García (2017) este parámetro abarca la forma de la fibra en dirección longitudinal, la forma de la sección transversal, el recubrimiento superficial o revestimiento y la presentación de las fibras.

La geometría de la fibra en dirección longitudinal influye principalmente en las condiciones de anclaje o características adherentes de la fibra. Las formas son muy variadas, habiendo fibras rectas, onduladas, corrugadas, con ganchos, como se observa en la Figura N° 16 (p.37).

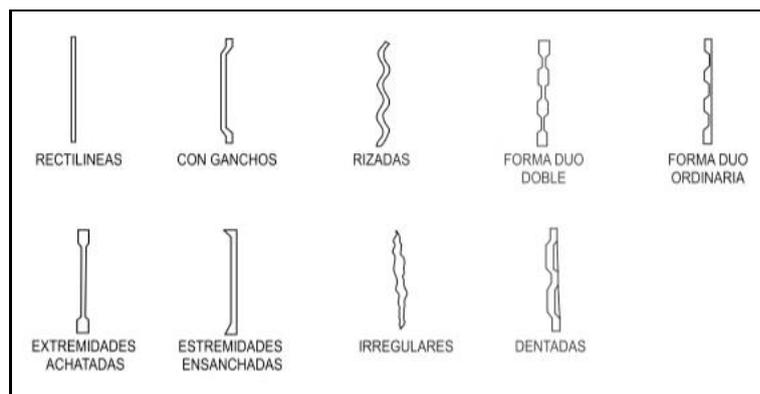


Figura N° 16: Formas en dirección longitudinal de fibras de acero

Fuente: MACCAFERRI, (2017)

De acuerdo a lo expuesto por el autor, una fibra de acero de forma recta sería menos adherente que una fibra de acero con ganchos en sus extremos. Por lo que es habitual encontrar fibras de acero que difieren en sus extremos con la finalidad de mejorar su anclaje.

Según Cañette, Eguren, & García (2017) las diferentes formas de la sección transversal de la fibra surgen por el proceso de fabricación de la fibra. Respecto a las fibras de acero, se presentan las secciones circulares (obtenidas mediante trefilado – tipo I), secciones rectangulares (obtenidas mayormente de fibras cortadas en láminas – tipo II) y secciones de formas irregulares (normalmente producto de la fundición del acero – tipo III), ver la Figura N° 17.

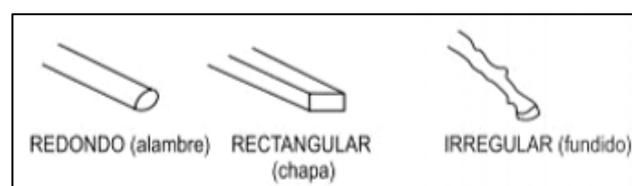


Figura N° 17: Formas de la sección transversal de fibras de acero

Fuente: MACCAFERRI, (2017)

Respecto a la presentación de las fibras, las fibras pueden incorporarse al concreto sueltas o encoladas (ver la Figura N° 18). A diferencia de las fibras sueltas, las fibras encoladas al incorporarse al concreto reducen el riesgo de formación de erizos, entendiéndose como la aglomeración de fibras (ver la Figura N° 19), además se incorporan fácilmente y de manera homogénea en la mezcla de concreto (p.38).

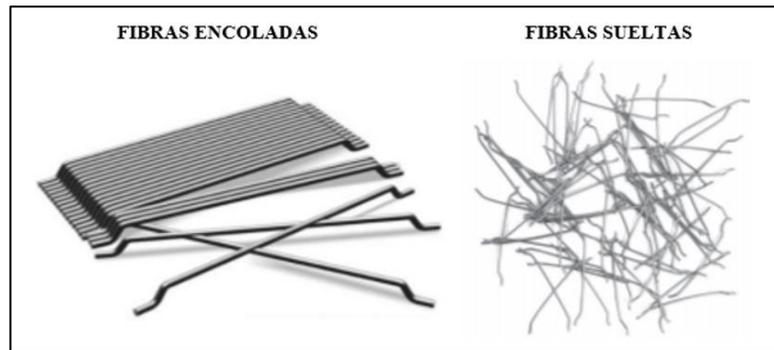


Figura N° 18: Fibras encoladas y sueltas de acero

Fuente: MACCAFERRI, (2017)



Figura N° 19: Formación de "erizos" o aglomeración de fibras

Fuente: Badell, (2016)

Finalmente respecto al recubrimiento superficial de las fibras de acero, MACCAFERRI (2017) menciona que las fibras pueden tener un revestimiento superficial de zinc (galvanizadas) para una mejor resistencia a la corrosión y garantizar la durabilidad de la fibra, en caso se aplique en ambientes de condiciones agresivas (p.20).

- Longitud de la fibra (L_f)

Según Caballero (2017) para mejorar la eficacia de las fibras, es importante la relación que hay entre el tamaño máximo del agregado grueso (TMA) y la longitud de la fibra. Según estudios, los resultados óptimos se consiguen cuando la longitud de la fibra es aproximadamente igual al doble del tamaño máximo del agregado. Además, es recomendable que el tamaño máximo del agregado grueso empleado no sea superior a 20mm (p.19).

Cañette, Eguren, & García (2017) mencionan que si las fibras son muy largas, habrán dificultades de manipulación y aparición de poros en la mezcla de concreto, por otro lado si las fibras son muy cortas no se generará un buen anclaje entre la fibra y el concreto, el cual es un factor importante para transmitir los esfuerzos (p.36).

- Esbeltez o ratio de la fibra (λ)

La esbeltez es la relación entre la longitud de la fibra y el diámetro equivalente de la fibra (L_f/d_f). Este parámetro tiene influencia en el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido, se considera que a mayor esbeltez de las fibras son más eficientes en el control de fisuración; sin embargo, se debe limitar el largo de las fibras para evitar la acumulación de fibras o erizos durante el mezclado del concreto (p.37).

En la Figura N° 20 se puede observar que la esbeltez influye en la tenacidad del concreto reforzado con fibras; el porcentaje de energía absorbida (tenacidad) aumenta cuando la esbeltez (L/D) de la fibra es mayor.

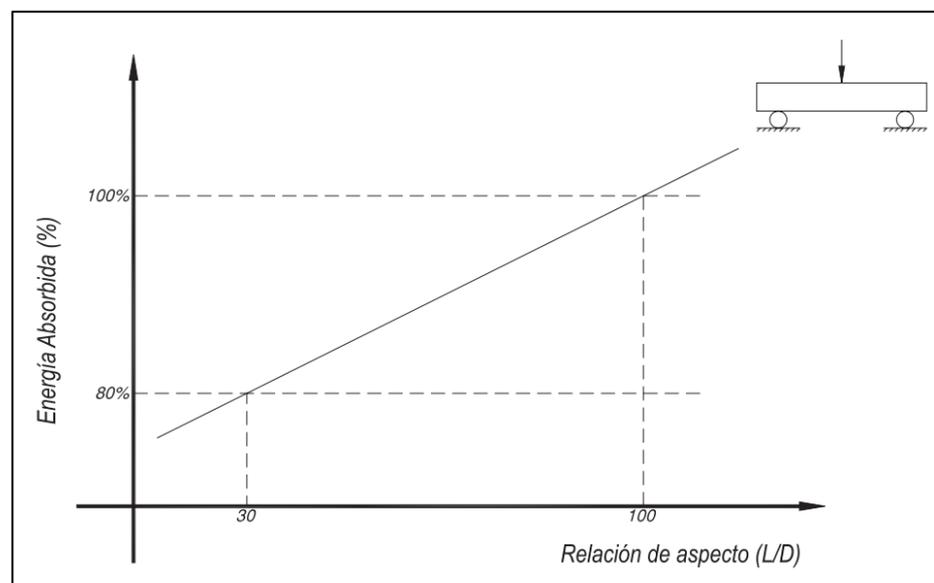


Figura N° 20: Gráfica de energía absorbida vs esbeltez de la fibra (L/D)

Fuente: MACCAFERRI, (2017)

- Módulo de elasticidad o módulo de Young de la fibra

Badell (2016) menciona que el módulo de elasticidad influye en la capacidad de refuerzo de la fibra en el concreto y es el parámetro encargado del control de formación de fisuras y grietas; por lo que solo cuando el módulo de elasticidad de la fibra es al menos 3 veces mayor que el módulo de elasticidad del concreto, se obtiene un mejor control de la longitud y apertura de fisuras.

Tabla N° 7: Características mecánicas de las fibras

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de elasticidad (Gpa)	Densidad (Kg/m ³)	Alargamiento de rotura (%)
Acero	500 - 3000	210	7800	3.5
Acero inoxidable	2100	160	7860	3
Vidrio	2000	60	2700	3.6
Carbono	3000	200 - 500	1900	0.5
Nylon	900	4	1100	13 - 15
Polipropileno	400 - 800	5 - 25	900	8 - 20
Poliéster	700 - 900	9.2	1400	11 - 13
Concreto	5 - 8	30	2300	-

Fuente: Blanco, (2008)

Según la Tabla N° 7 podemos observar que las fibras de polipropileno tienen un módulo de elasticidad muy similar al concreto; y por el contrario las fibras de acero poseen un módulo de elasticidad 7 veces mayor al del concreto. Por lo que se concluye, que al incorporar fibras de acero se tiene un mejor control del fenómeno de fisuración comparado con las fibras de polipropileno.

- Resistencia a tracción de la fibra ($\sigma_{m\acute{a}x}$)

Cañette, Eguren, & García (2017) define la resistencia a la tracción como la carga máxima a tensión que puede soportar la fibra; la cual se calcula dividiendo la carga máxima entre el área de la sección transversal media de la fibra (p.39).

Blanco (2008) menciona que la resistencia a tracción de las fibras depende de la calidad del acero, la resistencia a tracción de la fibra varía entre 400 y 1500 MPa con un bajo o medio contenido de carbono en su composición química, y hasta 2000 MPa aumentando el contenido de carbono, siendo este tipo de fibras adecuadas especialmente para concretos de alta resistencia (p.9). Según se observa en la Tabla N° 7, la resistencia a tracción de las fibras de acero varía entre 500 - 3000 MPa, mientras que de las fibras de polipropileno varía entre 400 - 800 MPa.

- Dosificación de la fibra

Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi (2004) menciona que los volúmenes de fibras de acero que se usan generalmente en el concreto varían entre el 0.25% al 2%. Sin embargo, cuando se usan volúmenes mayores al 2% de fibra de acero se disminuye la trabajabilidad de la mezcla de concreto y también la dispersión de las fibras, es decir hay menos distancia entre fibras, por lo que en este caso se requerirá de un diseño especial de las mezclas o alguna técnica especial de colado (p.154).

- Adherencia fibra-matriz

Caballero (2017) afirma que esta propiedad es fundamental para las fibras incorporadas en la mezcla del concreto, ya que cuando se produce la fisuración; las fibras forman una red que retrasa la rotura, incrementando la ductilidad del concreto. La forma de la fibra puede aumentar la adherencia física con el concreto, para que se produzca una falla en el concreto por rotura de la fibra y no por deslizamiento de la misma, como sucede generalmente en las fibras sin anclajes (fibras rectas) (p.22).

2.3.3.5. Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras

Las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras son influenciadas por estos factores, tales como: la geometría de la fibra, la esbeltez de la fibra, la orientación de la fibra, la distribución de la fibra dentro de la mezcla, la resistencia del concreto, dimensión máxima de los agregados u la adherencia fibra-concreto.

Las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras son:

a. Resistencia a la compresión

Caballero (2017) afirma que la resistencia a compresión del concreto no varía significativamente con la incorporación de fibras de acero, se puede obtener un incremento de resistencia a la compresión entre 0% a 15% con una dosificación en volumen no menor al 1.5% de fibras de acero en la mezcla del concreto.

Asimismo, respecto a las fibras de polipropileno, Armas (2016) afirma que su incorporación al concreto incrementa ligeramente la resistencia a compresión en un 3% cuando se aplica una dosificación de 400 gr/m³. Además, indica que se demostró que estadísticamente este aporte no es significativo.

b. Resistencia a la flexión

Según MACCAFERRI (2017) los ensayos de flexión de elementos de concreto reforzado con fibras pueden tener diversas respuestas, las cuales son representadas generalmente por el gráfico Carga vs. Deflexión o también por el gráfico Carga vs. Abertura de fisura.

El comportamiento del concreto es siempre elástico bajo cargas moderadas y no se produce ninguna fisuración en la probeta bajo el ensayo de flexión; sin embargo, cuando se incrementa la carga a partir del primer punto de fisuración (punto A), el comportamiento del concreto es totalmente diferente, el cual depende de la cantidad de fibras incorporadas a la mezcla, su geometría y sus propiedades mecánicas. A continuación, se describe el comportamiento de las siguientes curvas de la Figura N° 21:

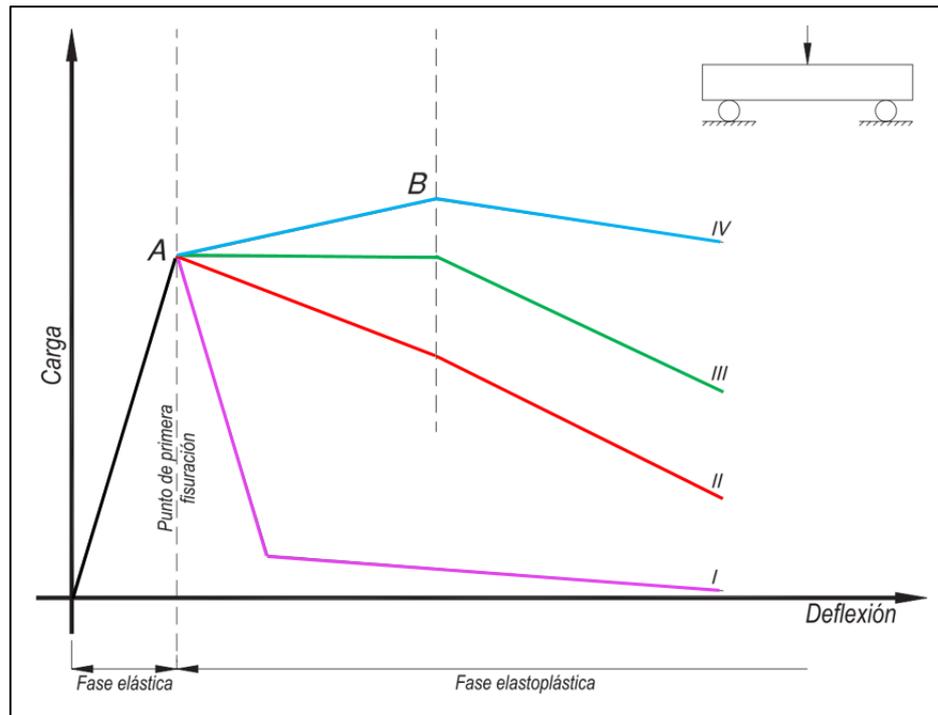


Figura N° 21: Respuesta de ensayo a flexión mediante gráfica carga vs deflexión
Fuente: MACCAFERRI, (2017)

- Curva I: la curva morada representa el comportamiento de un concreto simple sin reforzar, el cual se caracteriza por ser un material frágil que colapsa inmediatamente alcanzada la carga de la primera fisuración (punto A).
- Curva II: la curva roja muestra que el concreto reforzado con fibras post-fisuración mejora su capacidad para absorber cierta carga, por lo que tiene un colapso más lento.
- Curva III: la curva verde muestra el comportamiento de un material dúctil, donde el concreto reforzado con fibra post-fisuración es capaz de soportar desplazamientos bajo una carga constante, es decir tiene un comportamiento plástico.
- Curva IV: la curva azul muestra que el concreto reforzado con fibras puede absorber cargas un poco mayores con un amplio desplazamiento (A-B) (p.10).

c. Ductilidad

Badell (2016) define la ductilidad como el grado de deformación plástica que puede soportar un material, bajo la acción de una fuerza, hasta la rotura. La ductilidad es la propiedad opuesta a la fragilidad, que es cuando el material no acepta ninguna deformación plástica. Al incorporar las fibras, el concreto se transforma en un material dúctil, esto se debe a que las fibras actúan como un puente de transferencia de esfuerzos de tensión a través de las fisuras generadas en el concreto.

d. Tenacidad

Para Caballero (2017) la tenacidad es el producto o el área bajo la curva carga – deflexión, que representa la capacidad de absorber energía antes de alcanzar la rotura cuando el elemento estructural está sometido a carga, por lo que a mayor tenacidad se tiene una mayor capacidad de disipar energía. Esta propiedad depende principalmente de la adherencia de las fibras en el concreto y también del contenido, tipo y esbeltez de las fibras (p.22).

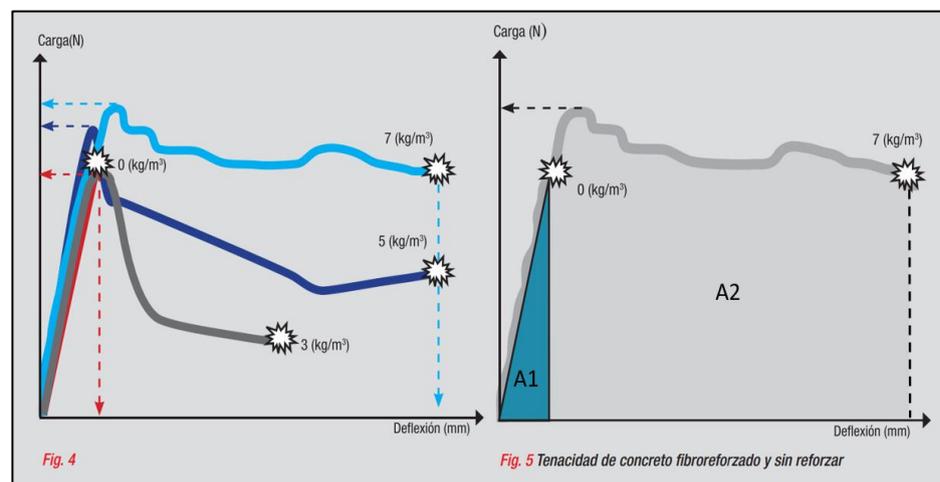


Figura N° 22: Tenacidad del concreto fibroreforzado y sin reforzar

Fuente: Sika Perú, (2011)

En la Figura N° 22, se observa que el concreto con mayor tenacidad es el que contiene una dosificación de 7 kg/m³ de fibras, ya que encierra la mayor área bajo la curva, además tiene una tenacidad mucho mayor que el concreto sin fibras (triángulo azul). Concluyendo que al incorporar

fibras al concreto se incrementa significativamente su tenacidad; ello permite que el concreto después del primer punto de fisuración pueda seguir soportando cargas bajo deformaciones mucho mayores, antes de colapsar, permitiendo que la estructura se mantenga en funcionamiento.

e. Resistencia a cargas dinámicas (impacto)

Según Jovells (2016) el concreto reforzado con fibras aumenta la resistencia a cargas dinámicas de 3 a 10 veces en comparación a la del concreto convencional. La adición de fibras hace que la matriz del concreto tenga una tendencia mucho menor a la desfragmentación y el arrancamiento. Asimismo, se produce un incremento significativo de la capacidad de absorción de energía por impacto, esta propiedad depende directamente de la geometría y cantidad de las fibras (p.19).

2.3.3.6. Ventajas y desventajas del uso de fibras

Según la literatura revisada, las fibras de acero son más eficientes que otro tipo de fibra, debido a que presentan una alta resistencia a la tracción, un alto módulo de Young y una gran facilidad de adherencia entre la fibra y el concreto. Las fibras de acero presentan una capacidad de resistencia post-fisuración, transformando el concreto en un material dúctil. Las fibras crean puentes de transferencia de los esfuerzos de tensión a través de las fisuras, previniendo que la apertura de la fisura sea mayor (ver la Figura N° 23). Esta característica es muy útil para elementos de superficie continua, como pisos y pavimentos rígidos.

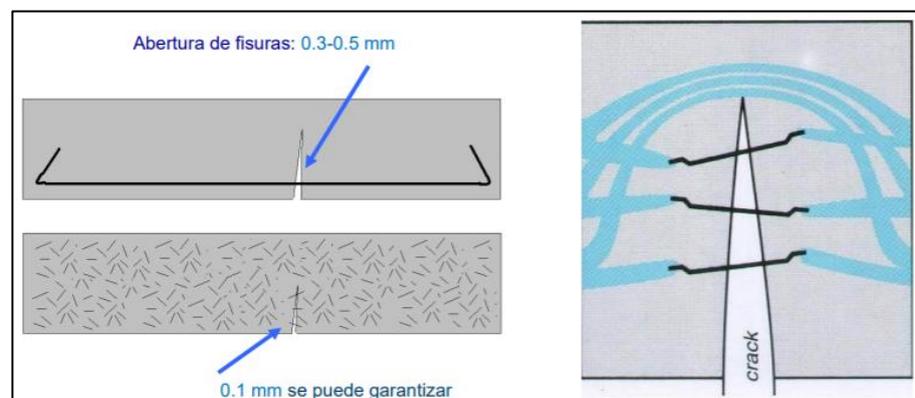


Figura N° 23: Mecanismo de control de propagación de las fisuras

Fuente: Badell, (2016)

La Figura N° 24 es una fotografía de un ensayo de rotura de una probeta de concreto reforzado con fibras de acero mediante el ensayo a tracción uniaxial, realizado en la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), donde se puede observar que las fibras actúan formando puntos de sutura dentro del concreto, impidiendo la propagación de las fisuras y retardando el colapso.



Figura N° 24: Rotura de probeta de concreto reforzado con fibras de acero
Fuente: Saludes, Aguado, & Molins, (2006)

Por otro lado, la incorporación de fibras a la mezcla de concreto, en ocasiones reduce la trabajabilidad de la mezcla, por lo que en ese caso será necesario el uso de un aditivo plastificante, para mejorar la consistencia del concreto que permita redistribuir las fibras en la mezcla.

Según la literatura revisada, otras ventajas de los concretos reforzados con fibras de acero son:

- Menor dificultad en comparación con la colocación un refuerzo convencional con malla de acero, reduciendo los costos de mano de obra calificada, eliminando los riesgos de una mala colocación del acero y reduciendo tiempos de construcción.
- Las fibras de acero aseguran un refuerzo homogéneo, más eficaz y tridimensional, en comparación con el refuerzo convencional.

- Se puede realizar el vertido del concreto reforzado con fibras de acero directamente desde el camión o mixer, y de ser necesario también puede ser bombeado.
- Las fibras de acero son fácilmente adicionadas al concreto, tanto en planta como a pie de obra.

Respecto a las ventajas de las fibras de polipropileno en el concreto; varios autores mencionan la reducción de la formación de fisuras en el pavimento, el incremento de la resistencia a compresión y flexión del concreto y la mejora de la calidad y durabilidad del concreto y por tanto del pavimento.

Además Mármol (2010) afirma que en comparación con las fibras de acero, las fibras de polipropileno son un material más económico y son inertes químicamente, por lo que no habrán problemas relacionados con la oxidación y absorción de agua (p.13).

Asimismo Valero (2015) señala como ventaja la baja densidad de las fibras de polipropileno lo que permite que esta quede embebida en el concreto durante el vibrado, de manera que no aflora a la superficie en contacto con el molde, y así la estética del elemento estructural permanece inalterada (p.60).

2.3.3.7. Aplicaciones de las fibras

Las fibras tienen aplicación en estructuras que requieren resistir los esfuerzos de tracción, tales como, losas de pavimentos rígidos, pisos industriales, pistas de aterrizaje, overlays, elementos prefabricados, concreto proyectado para obras de minería, túneles y proyectos hidráulicos, entre otros; varios estudios demuestran que las fibras mejoran la resistencia a la flexión del concreto, las cuales también se utilizan para reducir el espesor de la losa de concreto.

Respecto al concreto empleado en pavimentos, Blanco (2008) señala que requiere características particulares para dar respuesta a las exigencias estructurales, tales como:

- Resistencia a flexo-tracción: La losa de concreto de un pavimento es un elemento estructural que requiere de una elevada resistencia a flexo-tracción, ya que absorbe gran parte de los esfuerzos generados por las cargas vehiculares.
- Resistencia a fatiga: Es necesaria debido a la acción cargas vehiculares repetitivas.
- Trabajabilidad: El concreto debe ser fácilmente trabajable con los equipos de construcción, además tener una gran cohesión.
- Mínima retracción: La retracción es un problema común en los pavimentos, cuando la superficie predomina sobre el espesor, genera la formación de fisuras no deseables. Además, en pavimentos de carreteras es necesario tener resistencias iniciales altas ya que se forman generalmente fisuras considerables.

2.3.3.8. Normas referentes al concreto reforzado con fibras

- ASTM C1116 (2015): Estándar especificación de Concreto Reforzado con fibras y Concreto proyectado.

Esta norma informa al comprador sobre todos los tipos de concreto reforzado con fibra con los ingredientes uniformemente mezclados, las cuales pueden ser muestras y pruebas en los puntos de entrega.

- ASTM 820: Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete

Esta norma abarca los requisitos mínimos de las fibras de acero destinadas para su uso en concreto reforzado con fibras.

- ACI Committee - Report 544.1R (2002): State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete.

Incluye los principios fundamentales de los FRC, una descripción de los tipos de fibra, métodos de dosificación y mezcla, propiedades físicas, consideraciones de diseño y aplicaciones.

- ACI Committee - Report 544.2R (1989): Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete

Este informe trata sobre los procedimientos para la preparación de muestras y analiza las pruebas de trabajabilidad, resistencia a la flexión y absorción de energía del concreto reforzado con fibra o el concreto proyectado reforzado con fibra de material de acero, vidrio, poliméricas y naturales.

- ACI Committee – Report 544.3R (2008): Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete

Esta guía cubre la especificación, dosificación, mezcla, colocación y acabado del concreto reforzado con fibras (FRC).

- ACI Committee - Report 544.4R (2018): Guide to Design with Fiber - Reinforced Concrete

El fin de esta guía es proporcionar a los ingenieros pautas de diseño y recomendaciones para el uso de fibra como refuerzo en el concreto.

- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) (2008) - Anejo 14: Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras

Esta instrucción situada en el Anejo 14, establece recomendaciones específicas y complementarias para el concreto con fibras en estado fresco, en las primeras edades o en estado endurecido, donde pueden modificar algunas de sus propiedades.

2.4. Definición de términos básicos

- Concreto reforzado con fibras (CRF):

“El concreto reforzado con fibra (FRC) está hecho principalmente de cemento hidráulico, agregados y fibras de refuerzo discontinuas. Las fibras adecuadas para el concreto armado se han producido a partir de acero, vidrio y polímeros orgánicos (fibras sintéticas)” (ACI Committee 544, 2002, p.1).

- Dosificación de fibras:

“Es la cantidad de fibras en una unidad de volumen de matriz de concreto” (ACI Committee 544, 2002, p.5).

- Ductilidad:

“La capacidad de un material de someterse a deformación sin ruptura” (ACI Committee 544, 2002, p.9).

- Fibras de acero:

“Las fibras de acero para el refuerzo de concreto son tramos de acero cortos y discretos, lo suficientemente pequeños para ser dispersados al azar en el concreto usando procedimientos de mezcla comunes” (ACI Committee 544, 2002, p.8).

- Fibras de polipropileno:

“Las fibras de polipropileno, las más populares de las fibras sintéticas, son químicamente inertes, hidrofóbicas y ligeras” (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004, p.157).

- Pavimento rígido:

“Es una estructura constituida por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado, la cual se denomina sub-base del pavimento rígido” (Montejo, 2002, p.5).

- Resistencia a flexión:

“Mayor esfuerzo a flexión alcanzado en una prueba de resistencia a la flexión de un concreto reforzado con fibras como muestra” (ACI Committee 544, 2002, p.5).

- Tenacidad:

“Es el área bajo la curva carga-deflexión obtenido de una prueba estática de una muestra hasta una deflexión especificada. Es un indicador de la capacidad de absorción de energía de un material” (ACI Committee 544, 2002, p.5).

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La adición de fibras de acero o fibras de polipropileno incrementa la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos, hasta un 30% y 10% respectivamente.

3.1.2. Hipótesis específicas

- a) La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero incrementa hasta un 30%.
- b) La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno incrementa hasta un 10%.

3.2. Variables

3.2.1. Definición conceptual de las variables

Variables independientes:

- Fibras de acero: Secciones de metal que poseen una esbeltez (l/d) entre 20 a 100 (ACI Committee 544, 2002).
- Fibras de polipropileno: Secciones producidas por polímero de hidrocarburo sintético, generadas mediante procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel (Valero, 2015).

Variables dependientes:

- Resistencia a flexión del concreto: Medida de la resistencia a la tracción del concreto, es la medida de la resistencia a la falla por momento de la losa de concreto no reforzada (National Ready Mixed Concrete Association, s.f.).

3.2.2. Operacionalización de las variables

La tesis presenta las siguientes variables, representadas en la Tabla N° 8:

Tabla N° 8: Operacionalización de las variables

VARIABLES INDEPENDIENTES				
Variables	Descripción de la variable	Indicadores	Unidad de Medida	Instrumento
Fibras de acero	Secciones de metal que poseen una esbeltez (l/d) entre 20 a 100 (ACI Committee 544, 2002).	Dosificaciones de fibras de acero	kg/m3	Investigaciones nacionales e internacionales
Fibras de polipropileno	Secciones producidas por polímero de hidrocarburo sintético, generadas mediante procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel (Valero, 2015).	Dosificaciones de fibras de polipropileno	kg/m3	Investigaciones nacionales e internacionales
VARIABLES DEPENDIENTES				
Variables	Descripción de la variable	Indicadores	Unidad de Medida	Instrumento
Resistencia a flexión del concreto	Medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es la medida de la resistencia a la falla por momento de la losa de concreto no reforzada (National Ready Mixed Concrete Association, s.f.).	Incremento de la resistencia a flexión del concreto	%	Investigaciones nacionales e internacionales

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo, método, nivel y diseño de la investigación

4.1.1. Tipo de investigación

La investigación fue de tipo básica porque tuvo como objetivo mejorar el conocimiento, más que generar resultados o tecnologías que benefician a la sociedad en el futuro inmediato. Este tipo de investigación es esencial para el beneficio socioeconómico a largo plazo.

La investigación analizó la influencia de la adición de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos, en base a resultados de investigaciones nacionales e internacionales, para generar una base de información organizada y comparativa que mejore los conocimientos sobre el uso de las fibras.

4.1.2. Método de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo porque se recolectaron resultados de resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero y polipropileno de investigaciones nacionales e internacionales, a los cuales se les aplicó un análisis estadístico con la finalidad de analizar el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto y así comprobar las hipótesis establecidas previamente.

4.1.3. Nivel de investigación

El nivel de investigación fue descriptivo, porque consistió en describir el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero y polipropileno usado en pavimentos rígidos.

4.1.4. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue no experimental, transeccional – descriptivo.

El diseño de investigación fue no experimental porque la investigación se realizó sin manipular intencionalmente las variables.

El diseño de investigación fue de tipo transeccional o transversal porque se recolectó los datos de la investigación en un tiempo único. La investigación se realizó en el año 2020, y no se consideró los cambios que pudiesen venir después.

El diseño de investigación fue de tipo descriptivo porque consistió en describir el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero y polipropileno usado en pavimentos rígidos.

4.2. Población de estudio

La población de estudio de la tesis estuvo conformada por 31 investigaciones nacionales y 13 investigaciones internacionales, que permitieron conocer los resultados a los 28 días de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero y polipropileno, a través del módulo de rotura (MR).

4.3. Diseño muestral

Se determinó que el tamaño de la muestra sea igual a la población, se empleó la totalidad de las investigaciones nacionales e internacionales recolectadas, ya que se buscó tener la mayor precisión en los resultados del análisis estadístico. Por tanto, no se requirió de un muestreo probabilístico.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se empleó la técnica de análisis documental porque la tesis se realizó apoyándose en fuentes de carácter documental, como trabajos de investigación nacionales e internacionales. Respecto al instrumento de recolección de datos fue una base de datos en Excel para almacenar la información recopilada de los trabajos de investigación nacionales e internacionales. La base de datos contiene en otros datos, los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a flexión del concreto, la dosificación de fibra incorporada, el tipo de fibra utilizada, etc.

4.5. Procedimientos para la recolección de datos

Se recolectó los datos cuantitativos y cualitativos más relevantes de cada investigación nacional e internacional de la muestra, entre ellos están los resultados del ensayo de resistencia a flexión del concreto (módulo de rotura), la dosificación de fibra incorporada, el tipo de fibra utilizada, etc. La información se almacenó en una base de datos en Excel.

4.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Mediante un análisis estadístico descriptivo de los datos se representó los resultados mediante gráficos. Una vez descritos adecuadamente los datos, se procedió a un análisis estadístico inferencial para determinar una correlación entre las variables “resistencia a flexión del concreto” y “las fibras de acero o polipropileno”; y proyectar el máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto y la dosificación óptima de fibras. Finalmente, al analizar los resultados se pudo plantear las conclusiones del estudio.

CAPÍTULO V: USO DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

5.1. Mercado de fibras a nivel nacional e internacional

El uso de fibras tanto de acero como de polipropileno están siendo utilizados en proyectos de pavimentos rígidos, losas industriales, dovelas, elementos prefabricados de diversos países del mundo, incluso empleados en obras del Perú. A nivel nacional hay poco uso de esta tecnología en pavimentos rígidos, esto se debe a que se tiene poco conocimiento del producto, su forma de aplicación y sus beneficios, tales como mejorar el comportamiento a flexión del concreto y controlar el fenómeno de fisuración del pavimento rígido.

Se muestra en la Tabla N° 9, las empresas más conocidas en el mercado peruano que comercializan fibras de acero y fibras de polipropileno como refuerzo del concreto.

Tabla N° 9: Marcas de fibras a nivel nacional

Empresa	Tipo de Fibra	Marca de Fibra
Sika Perú S.A.	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB
	Acero	SikaFiber CHO 65/35 NB
	Acero	SikaFiber LHO 45/35 NB
	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force-60
	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP-48
	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE
	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP-65
Maccaferri de Perú S.A.C.	Acero	Wirand FF1
	Acero	Wirand FF3
	Acero	Wirand FS3N
	Microfibras de Polipropileno	FibroMac
Prodac - Bekaert	Acero	Dramix 3D 80/60 BG
	Acero	Dramix 4D 55/60 BG
	Acero	Dramix RC 65/35 - BN
Z Aditivos S.A.	Acero	Fibra Metálica Z 80/60
	Microfibras de Polipropileno	Fibra Z de Polipropileno
Chema	Microfibras de Polipropileno	Chema Fibra Ultrafina

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en la Tabla N° 10 y Tabla N° 11 se presentan las mejores empresas a nivel internacional del mercado de fibras de acero y fibras de polipropileno como refuerzo del concreto, comercializado en varios países del mundo, tales como España, Estados Unidos, México, Colombia, Ecuador, Chile, Venezuela y Guatemala.

Tabla N° 10: Marcas de fibras a nivel internacional

Empresa	Descripción	Tipo de Fibra	Marca de Fibra
Bekaert	Es una empresa líder en el mercado mundial de fibras de acero Dramix para refuerzo de concreto con sede en Bélgica, cuenta con clientes en más de 120 países. Tiene sucursales en América Latina, entre ellos Chile, Colombia, Ecuador, Perú; en América del Norte cuenta con más de 20 plantas y oficinas de ventas en EE.UU., Canadá y México; y también cuenta con sucursales en China, Japón, Europa, Medio Oriente y África.	Fibras de acero	Dramix RC 65/35 - BN
		Fibras de acero	Dramix RC 65/60 - BN
		Fibras de acero	Dramix RC 80/35 - BN
		Fibras de acero	Dramix RC 80/60 - BN
		Fibras de acero	Dramix RC 65/35 - BG
		Fibras de acero	Dramix 3D 80/60 - BG
		Fibras de acero	Dramix 3D 65/35 - GH
		Fibras de acero	Dramix 4D 65/35 - BG
		Fibras de acero	Dramix 4D 65/60 - BG
Maccaferri	Es una empresa global con sede en Zola Predosa, ciudad de Bolonia, Italia; tiene más de 70 sucursales operando en los 5 continentes, incluido Perú.	Fibras de acero	Wirand FF1
		Fibras de acero	Wirand FF3
		Fibras de acero	Wirand FS1
		Fibras de acero	Wirand FS3N
		Fibras de acero	Wirand FS4N
		Fibras de acero	Wirand FS7
		Microfibras de Polipropileno	FibroMac 12
ABC Polymer Industries	Es el principal productor en EE.UU. de más de 30 tipos de fibras micro sintéticas, macro sintéticas, y de acero para concreto.	Acero	FiberForce T1
		Acero	FiberForce T5-50
		Microfibras de Polipropileno	FiberForce 300™
		Microfibras de Polipropileno	FiberForce 500™
		Microfibras de Polipropileno	FiberForce 150™
Sika Group	Sika es una empresa suiza líder en soluciones de concreto reforzado con fibras, tiene filiales en 100 países de todo el mundo, incluido Perú. Su principal marca de fibras es SikaFiber, también tienen las marcas Fibermesh, Enduro, Novocon, Novomesh y Fibercast.	Fibras de acero	Sika Fiber CHO 65/35 - NB
		Macrofibras de Polipropileno	Sika Fibermesh 665
		Macrofibras de Polipropileno	Sika Fibermesh 650
		Macrofibras de Polipropileno	Sika Fiber Enduro 600
		Macrofibras de Polipropileno	Sika Fiber PP-48
		Macrofibras de Polipropileno	Sika Fiber Force PP/PE - 700/55

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 11: Marcas de fibras a nivel internacional

Empresa	Descripción	Tipo de Fibra	Marca de Fibra
ArcelorMittal Wire Solutions	Es una la mayor compañía siderúrgica mundial ubicada en la ciudad de Luxemburgo, es uno de los proveedores líder de fibras de acero a nivel mundial y ofrece una amplia gama de fibras, con presencia en más de 25 países, incluido Perú.	Fibras de acero con extremos en gancho	HE 55/35, HE 1/50
		Fibras de acero onduladas	TABIX 1/50, TABIX 1/60
		Fibras de acero rectas con extremos planos	FE 60/36
The Euclid Chemical	Es un fabricante de fibras micro y macro sintéticas y fibras de acero para el concreto, cuenta con filiales en Guatemala, Costa Rica, Panamá, Ecuador, Colombia y Chile.	Macrofibras de Polipropileno	Tuf - Stran SF
		Microfibras de Polipropileno	FiberStrand 150
BASF	Es la empresa química multinacional con sede central en Alemania, cuenta con sucursales en más de 80 países; entre ellos 16 en América latina: Chile, Colombia, Argentina, Ecuador, México, Uruguay, Brasil, Perú, entre otros.	Macrofibras de Polipropileno	MasterFiber MAC Matrix
		Macrofibras de Polipropileno	MasterFiber MAC 50
		Microfibras de Polipropileno	MasterFiber M 100
Propex Operating Company	Es una empresa pionera en la industria de fibras sintéticas de refuerzo para concreto, cuenta con instalaciones en EE.UU., Brasil, México, Alemania y Hungría.	Macrofibras de Polipropileno	Enduro 600
Elasto Plastic Concrete	Es el principal proveedor líder mundial de fibras sintéticas estructurales marca BarChip para concreto.	Macrofibras de Polipropileno	BarChip 48
		Macrofibras de Polipropileno	BarChip 54
		Macrofibras de Polipropileno	Bar chip 60
		Macrofibras de Polipropileno	Bar chip R50
Forta Corporation	Es una de las empresas de EE.UU. más reconocida en la industria de fibras sintéticas de refuerzo.	Macrofibras de Polipropileno	Forta-FERRO
		Macrofibras de Polipropileno	FERRO-GREEN

Fuente: Elaboración propia

Según Bekaert (2007) las fibras de acero Dramix surgen en 1970, después de 10 años de investigación, y son consideradas en la actualidad la mejor opción en el mercado mundial. La marca Dramix forma parte de la empresa Bekaert, empresa de alambre y derivados más grande del mundo, considerada la empresa líder a nivel mundial en el mercado de fibras de acero. Esta empresa es muy solicitada por realizar el diseño para pavimentos y otras estructuras reforzadas con fibras de acero, sin costo adicional, y también brindar asesoría técnica en el lugar de construcción. El reportaje menciona que solo en México, se han diseñado y suministrado fibras de acero Dramix en aproximadamente 3.5 millones de m² de pavimentos reforzados con fibras de acero para centros comerciales, fábricas, aeropuertos y centros de distribución (p.1).

Según Ocampo (2018) el uso de fibras Dramix en Colombia inició su crecimiento en el año 2000 en obras subterráneas, años después empezó a utilizarse como refuerzo principal para pavimentos rígidos, en el país se han construido más de 4 millones de m² de pavimentos de concreto reforzados con fibras de acero Dramix.

Zigurat Global Institute of Technology (2013) menciona que el consumo de fibras de acero a nivel mundial es de aproximadamente 500,000 Tm/año y a nivel de España el consumo es entre 15,000 y 20,000 Tm/año, con aplicaciones del 60% en obras subterráneas, el 30% en pavimentos, el 5% en estructuras prefabricadas y el resto aplicado a otras obras. Las fibras se aplican tradicionalmente en elementos prefabricados porque permiten reducir su espesor; y en pavimentos porque permiten controlar la fisuración y reducir el número de juntas en el pavimento.

5.2. Obras ejecutadas de pavimentos de concreto reforzado con fibras en Perú

Se ha recopilado información de obras ejecutadas en diversos lugares del Perú, específicamente la descripción del proyecto ejecutado, el año de ejecución, la entidad encargada de la ejecución del proyecto, el tipo y marca de la fibra utilizada.

5.2.1. Mejoramiento de los Pasajes Cleto Martínez, General Montero, Manuel de la Torre y Coronel Bustamante, Pucallpa

Lao (2007) propuso la aplicación fibras de acero a un proyecto real en la ciudad de Pucallpa, ejecutada por el Gobierno Regional de Ucayali entre el año 2006 y 2007. El proyecto consistió en realizar la pavimentación en los pasajes Cleto Martínez, General Montero, Manuel de la Torre y Coronel Bustamante, con un total de 118 losas de concreto reforzado, de tramos de 4.00 m x 3.60 m y un tramo de gran dimensión de 14.00 m x 3.60 m, las cuales fueron reforzadas con fibras de acero tipo Wirand FF1, adquiridas por la empresa Maccaferri de Perú S.A.C, utilizando una dosificación de 25 Kg/m³ de fibras; para un diseño de mezcla con una resistencia de diseño $f'c = 210$ Kg/cm². El tiempo programado de ejecución de la obra fue de 150 días calendarios, sin embargo, la incorporación de fibras de acero redujo el tiempo de trabajo a 105 días calendarios. La realización del proyecto tuvo un costo total de S/ 1 211 160.00.

5.2.2. Mejoramiento vial del Jirón Gonzáles Prada de la ciudad de Puerto Maldonado, Madre de Dios

Según la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones (2017) el proyecto consistió en el mejoramiento vial del Jr. Gonzales Prada, ubicado en la ciudad de puerto Maldonado, en el distrito y provincia de Tambopata, la construcción de la obra inicio el 17 de junio del 2015 y culmino el 01 de junio del 2017, por medio del Gobierno Regional de Madre de Dios y la Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones. Se ejecutaron 19 tramos de pavimento ubicados desde la intersección con la prolongación del Jr. 26 de diciembre hasta la intersección con el Jr. Javier Heraud (ver en la Figura N° 25).

Se ejecutó la construcción de 27,132.75 m² de pavimento rígido reforzado con fibras de acero de la marca Wirand FF1, con una resistencia de diseño $f'c = 245 \text{ kg/cm}^2$, con un ancho de 6.00m de cada vía y 0.15 m de espesor de losa. La realización del proyecto tuvo un costo total de S/ 9'990,983.81.



Figura N° 25: Antes y después del mejoramiento vial del Jr. Gonzales Prada, Puerto Maldonado.

Fuente: Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones, (2017)

5.2.3. Mejoramiento de la Av. Sánchez Cerro, Piura

Según CAPECO (2018) la obra vial de mejoramiento de la Av. Sánchez Cerro tramo Av. Gullman – Av. Chulucanas se ejecutó con la finalidad de mejorar la transitabilidad de la ciudad de Piura (ver la Figura N° 26). El proyecto tuvo una extensión aproximada de 3.5 km, y estuvo a cargo de la empresa constructora Cosapi S.A, tuvo una inversión total de S/ 95.5 millones, financiada por el consorcio de las empresas Backus y Johnston, Cementos Pacasmayo e Interbank bajo el mecanismo de obras por impuestos. El proyecto fue construido en un plazo de 20 meses, el cual consistió en 8 carriles, los 4 carriles centrales, que constituyen la vía principal pavimentada, está conformada en sus primeros 1.64 km por una carpeta asfáltica en caliente y los siguientes 2.1 km por un pavimento rígido. Según información brindada por la empresa Pacasmayo; las losas de concreto del pavimento rígido fueron reforzadas con fibras de polipropileno con una dosificación de 2.50 kg/m³, para un concreto con resistencia diseño de $f'c = 400 \text{ Kg/cm}^2$.



Figura N° 26: Obra vial concluida de la Av. Sánchez Cerro tramo Av. Gullman – Av. Chulucanas

Fuente: CAPECO, (2018)

5.2.4. Almacén Cormin, Callao

Según MACCAFERRI (2011) el proyecto consiste en la construcción de nuevas losas de concreto como parte de la ampliación de las plantas de almacenamiento de concentrados de mineral de la Empresa Cormin, ubicado en el Callao (ver la Figura N° 27). El proyecto requería la construcción de una losa de concreto con una extensión de 17,000 m que debía soportar el tránsito de camiones pesados y el peso concentrado del mineral depositado en pilas, con un peso específico de 3.0 ton/m³. Además, se requería que el proyecto se ejecute en el menor tiempo posible. Para cumplir con altos estándares de calidad de resistencia y durabilidad del proyecto, se utilizó un concreto con una resistencia de $f'c=280$ Kg/cm² mezclado con fibras de acero de marca Wirand FF1, con una dosificación de 25 Kg/m³. Las fibras fueron suministradas por la Empresa Maccaferri de Perú, quien también brindó asesoría técnica durante la ejecución de la obra. La Empresa Vásquez Saint John fue la encargada de la construcción de la obra, iniciando en octubre del 2008 y culminó en diciembre del mismo año.



Figura N° 27: Ejecución de obra Almacén Cormin, Lima- Perú

Fuente: MACCAFERRI, (2011)

5.2.5. Patio Norte Sinchi Roca en el distrito de Comas, Lima

Prodac Institucional (2014) el ingeniero residente de la obra, Manuel Mejía Medina, detalla que la obra consistió en la construcción de losas del pavimento en el Patio Norte Sinchi Roca del Sistema de Transporte Metropolitano de Lima ubicado en el Distrito de Comas, entre la intersección de la Av. Los Incas con la Av. Sinchi Roca. El proyecto requería la construcción de una losa de concreto de 61,370 m² con un espesor de 0.20 m, en un plazo de 30 días.

Debido a los requerimientos de la obra, se procedió a utilizar un concreto con una resistencia de $f'c=280$ Kg/cm² mezclado con fibras de acero marca Dramix RC-65/60-BN con una dosificación de 20 Kg/m³, las fibras de acero fueron suministradas por la empresa Prodac-Bekaert, quien también brindó la asesoría técnica en la ejecución de la obra. La finalidad del uso de fibras Dramix fue para dar mayor resistencia a tracción a la losa de concreto, la cual debe soportar la carga vehicular del Sistema de Transporte Metropolitano. La empresa encargada de construcción fue RINOL PAVIMENTA S.A., iniciando la ejecución de la obra el 20 de mayo del 2010.

Finalmente, el ingeniero residente Manuel Mejía comenta que no hubo inconvenientes en la trabajabilidad del concreto al incorporar las fibras Dramix. Además, el uso de las fibras dio mayor facilidad en el proceso constructivo, ya que se adicionaron directamente al mixer; a diferencia de la malla electrosoldada que requiere un mayor tiempo para su correcta colocación, por lo que las fibras brindan un ahorro de tiempo en obra..

5.3. Obras ejecutadas a nivel internacional de pavimentos de concreto reforzado con fibras

5.3.1. Experiencias en Brasil

Collazos (2012) menciona que en Brasil se realizó un proyecto de pavimento hidráulico reforzado con fibras de acero en el Terminal de Contenedores del Puerto de Paranaguá en el año 2002. Esta obra tuvo una superficie total de 250 000 m², se construyeron losas de concreto reforzadas con fibras de acero tipo Dramix RC-80/60-BN, con un espesor de 0.30 m y 0.40 m. en diferentes tramos, la resistencia diseño del concreto fue de 350 Kg/cm².

5.3.2. Experiencias en Chile

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (2015) presenta varios proyectos desarrollados en el país de Chile, a continuación se describen las consideraciones tomadas en cada proyecto:

- Proyecto Pavimentos de Fábrica de Contenedores MAERSK

Este proyecto contempló la construcción de losas de concreto para la fábrica de contenedores de la empresa MAERSK, ejecutada durante los años 2013 y 2014, en la ciudad de Malvilla en San Antonio; en el diseño de concreto del pavimento rígido se usó fibras de acero tipo Dramix 3D 80/60-BG con una dosificación de 30 Kg/m³. El proyecto tuvo un total de 18 000 m² de pavimento rígido, con un espesor de losa de concreto de 0.30m.

- Proyecto del Puerto de Valparaíso – Sector de Acopio de Contenedores

El proyecto realizado en el Puerto de Valparaíso, fue ejecutada por la constructora BELFI; consistió en colocar pavimento hidráulico en el sector de acopio de contenedores. Las losas de concreto fueron diseñadas con un espesor de 0.35 m, reforzadas con fibras de acero tipo Dramix RC-80/60-BN con una dosificación de 40 Kg/m³.

- Proyecto Bodegas Inmobiliaria ANYA Miraflores – Santiago

Esta obra consistió en la construcción del pavimento hidráulico para las bodegas de la inmobiliaria ANYA, la cual fue ejecutada por medio de la empresa RINOL HORMIPUL. El área total pavimentada fue de 80 000 m², considerándose losas de concreto reforzadas con fibras de acero tipo Dramix 3D 80/60-BG con una dosificación de 30 Kg/m³; con dimensiones de losa de 20.00 x 20.00 m y un espesor de 0.17 m

5.3.3. Experiencias en Costa Rica

Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (2015) indica que en el país de Costa Rica, en la ciudad de San José, se llevó a cabo el proyecto de pavimentación con losas de concreto en CEDISA (Centro de Diagnóstico Especializado), este fue ejecutado por USC Soluciones en el año 2009. El proyecto tuvo un área total a pavimentar de 18 000 m², con losas de concreto de 2.50 x 2.50 m. y 0.12 m de espesor. El concreto fue diseñado con una resistencia a la flexotracción de 38 Kg/cm² al cual se le incorporo fibras de acero de tipo Dramix RC-80/60-BN.

5.3.4. Experiencias en Guatemala

En el país de Guatemala se ejecutó un proyecto de pavimento hidráulico llamado “Pavimentos La Boscana” en el año 2005, esta obra tuvo un tamaño total de 14 500 m², las losas de concreto tuvieron un espesor de 0.12 m. y dimensiones de 1.50 m x 1.50 m. Las losas de concreto fueron reforzadas con fibras de acero tipo Dramix RC-80/60-BN para un concreto con resistencia a la flexión de 42 Kg/cm².

5.3.5. Experiencias en México

En la ciudad de Zacatecas-México, se desarrolló un proyecto en el año 2007 denominado “Boulevard Antonio Fernández”, ejecutado por Grupo Modelo. Esta obra consistió en la construcción de un pavimento hidráulico con un área total de 40 500 m², las losas de concreto con dimensiones de 5.50 x 5.50 m. y un espesor de 0.18 m. Se incorporaron fibras de acero tipo Dramix RL-45/50-BN a las losas de concreto, con una resistencia a la flexión de 42 Kg/cm².

5.3.6. Experiencias en España

Zigurat Global Intitue of Technology (2013) menciona diversos proyectos de pavimentos hidráulicos reforzados con fibras ejecutados en España, a continuación, se describirán las consideraciones relevantes de estas obras:

- Centro Logístico Porcelanosa

El proyecto se realizó en el Centro Logístico de la compañía Porcelanosa Grupo, con un área total de pavimento hidráulico de 17 680 m², las losas de concreto fueron reforzadas con fibras de acero tipo Dramix RC 80/60-BN, con un espesor de 0.35 m. Se tuvo en cuenta una resistencia a la compresión del concreto de 300 Kg/cm².

- Instalaciones Militares – Cerro Muriano

El proyecto de pavimentación hidráulica fue desarrollado en el año 1991, con una extensión de 30 000 m². Se consideró un espesor de las losas de concreto de 0.17 m, el concreto fue reforzado con fibras de acero tipo Dramix RC 80/60-BN con una dosificación de 35 Kg/m³.

Asimismo, Collazos (2012) referencia que en España se ejecutó entre los años 1995 y 2000 el proyecto Puerto de Algeciras, el cual consistió en colocar un pavimento hidráulico con una superficie de 250 000 m², este puerto tiene una capacidad de recibir 400 000 containers al año. El concreto del pavimento hidráulico fue reforzado con fibras de acero tipo Dramix RC-80/60-BN con una dosificación de 35 kg/m³, con un espesor de losa de 0.30 m y una resistencia de diseño de 350 Kg/cm² (p.122).

5.3.7. Experiencias en Estados Unidos

Barman & Hansen (2018) describe el desempeño de varios proyectos de overlays y pavimentos de concreto reforzado con fibras (FRC), construidos en diferentes estados de Estados Unidos. A continuación, se detalla la información de los proyectos de pavimentos y overlays (revestimientos ultrafinos) de concreto reforzado con fibras, construidos en los siguientes estados:

- Georgia

En Georgia, se han construido overlays desde el año 1998 y se han empleado FRC en los proyectos construidos entre los años 2003 y 2010. En la Tabla N° 12 se describe proyectos construidos, donde se incorporaron fibras de polipropileno con una dosificación de 1.70 Kg/m³. No se disponía de información sobre las características de la fibra utilizada (p.26).

Tabla N° 12: Proyectos de overlays reforzados con fibras en Georgia

Nombre del Proyecto	Ubicación del proyecto	Año de Construcción	Espesor (pulg)	Dosificación (Kg/m ³)	Tipo de Fibra
US80 / SR26	Chatham	2007	4.00	1.78	Polipropileno
SR204	Chatham	2007	4.00	1.78	Polipropileno
SR196 / SR 119	Liberty	2005	4.00	1.78	Polipropileno
US 82 / US 84	Ware	2003	4.00	1.78	Polipropileno
SR 99	Glynn	2008	4.00	1.78	Polipropileno
SR4 & Woodlawn	Appling	2007	4.00	1.78	Polipropileno

Fuente: Barman & Hansen, (2018)

- Illinois:

En este estado se ha usado concreto reforzado con fibras en aproximadamente 25 proyectos de pavimentos hidráulicos de losas delgadas y ultra delgadas, ver la Tabla N° 13. La mayoría de estos proyectos presenta espesores de losas entre 2 a 6 pulgadas (5.08 a 25.40 cm), así como la gran parte hace uso de fibras sintéticas con dosificaciones entre 1.80 y 4.43 Kg/m³, así también existen algunos proyectos donde emplearon fibras de acero con dosificaciones entre 23.60 y 47.20 Kg/m³ (p.27).

Tabla N° 13: Proyectos de overlays reforzados con fibras en Illinois

Nombre del Proyecto	Año de Construcción	Espesor (pulg)	Índice de Tráfico Medio Diario	Tipo de Fibra	Dosificación (Kg/m ³)
Stage Coach Trail Rd.	1998	3.00	4500	Sintética	1.78
Marion Street	2001	4.00	3470	Acero	23.73
Jefferson Street Hybrid	2002	3.00	12600	Sintética	1.78
CO HW 6 Xenia Lola Rd	2010	5.00	700	Sintética Marca GTR Advantage	2.37
Tower Hill	2010	5.00	1650	Sintética Marca GTR Advantage	2.37
Western University Dr.	2011	5.00	6700	Sintética Marca GTR Advantage	2.37
Il Route Old 66	2012	4.00	8600	Sintética Marca Strux 90/40	2.37
North Ind. Dr.	2014	4.00	3100	Sintética Marca Strux 90/40	2.37
Kaneville Quarry entrance	2004	4.50	80 - 120 (camiones de grava)	Sintética	2.37
Lake St. Glenview	2004	4.00	27600	Sintética	4.45
Shank Ave	2005	4.00	11700	Sintética	2.37
Macomb	2009	4.00	Tráfico Comercial	Sintética	2.37
Gladstone	2010	5.00	800	Sintética	2.37
Country HW 9	2010	5.50	550	Sintética	2.37
Left Ramp	2011	4.00		Sintética	4.45
Finley Rd.	2012	5.00		Sintética	2.37
53 North Bound	2012	4.00	1350	Sintética	2.37

Fuente: Barman & Hansen, (2018)

Uno de los proyectos es “North Lorang Road”, en el condado de Kane, el pavimento está compuesto por una losa de espesor de 4.50 pulgadas (11.43 cm) reforzado con fibras de polipropileno con una dosificación de 2.37 Kg/m³. Se hizo un monitoreo de este proyecto, afirmando que aún tiene un desempeño excelente e incluso superó las expectativas de vida útil de diseño, a pesar que soporta la carga de aproximadamente 120 camiones de cantera por día.

La incorporación de fibras en las losas de concreto ha reducido el porcentaje de deterioro por fisuras y grietas; además han evitado el desplazamiento de las losas en las juntas; a diferencia de algunas losas de concreto donde no se incorporó fibras y si se desplazaron, como se aprecia en la Figura N° 28 (p.27).



Figura N° 28: Desplazamiento de losas sin fibras en proyecto North Lorand Road

Fuente: Barman & Hansen, (2018)

- Minnesota:

Minnesota es uno de los estados en donde se han utilizado fibras en el concreto para la construcción de carreteras y su rehabilitación. En la carretera MnRoad existen 11 celdas de concreto, construidas con fibras incorporadas al concreto, estas fueron observadas y también fueron revestidas con concreto delgado y fibras hasta el año 2016, además de construirse 7 celdas más entre junio y septiembre del año 2017 (p.30-31).

A continuación, en la Tabla N° 14 se describe las celdas de concreto de la carretera MnRoad.

Tabla N° 14: Celdas de la carretera MnRoad reforzadas con fibras en Minnesota

Nombre del Proyecto	Año de Const.	Espesor (pulg)	Índice de Tráfico Medio Diario	Tipo de Fibra	Marca	Dosificación (Kg/m3)
Cell 92	1997	6.00	14000	Polipropileno (no estructural)	Propex Fibermesh	1.78
Cell 93	1997	4.00	14000	Polipropileno (no estructural)	Propex Fibermesh	1.78
Cell 94	1997	3.00	14000	Polipropileno (no estructural)	Propex Fibermesh	1.78
Cell 95	1997	3.00	14000	Poliolefina (estructural)	3M	14.83
Cell 96	1997	6.00	14000	Poliolefina (estructural)	3M	14.83
Cell 97	1997	6.00	14000	Polipropileno (no estructural)	Propex Fibermesh	1.78
Cell 160	2013	5.00	28000	Sintética (estructural)	Propex Fibermesh	3.86
Cell 161	2013	5.00	28000	Sintética (estructural)	Propex Fibermesh	3.86
Cell 162	2013	4.00	28000	Sintética (estructural)	Propex Fibermesh	3.86
Cell 163	2013	4.00	28000	Sintética (estructural)	Propex Fibermesh	3.86

Fuente: Barman & Hansen, (2018)

- **Kansas:**

En el estado de Kansas existe varios proyectos, ver la Tabla N° 15, en los cuales se empleó concreto reforzado con fibras. Se evidencio en algunos proyectos, algunas fallas como grietas y desconchado, así como también en otros hubo un buen desempeño. Estas obras incorporaron una dosificación de 1.78 Kg/m3 de fibra a la mezcla de concreto (p.30).

Tabla N° 15: Proyectos de overlays reforzados con fibras en Kansas

Nombre del Proyecto	Año de Construcción	Espesor (pulg)	Índice de Tráfico Medio Diario	Tipo de Fibra	Comentarios
UTW 21 st Street East Witten Berg	1997	3.00	1640	Polipropileno Estructural	Sección bastante agrietada y parte inferior muy agrietada de la losa
UTW Mission Road 83 rd Street NB Appr.	1998	3.00	17500	Polipropileno Estructural	En buenas condiciones
UTW Niemanrd 47 th St.	1998	3.00	6100	Polipropileno Estructural	Condición excelente
UTW Quivira rd. And Johnson Drive	1997	3.00	11720	Polipropileno Estructural	Buena condición
UTW US 24, Rochester rd. To Kansas ave.	1998	3.50	17400	Polipropileno Estructural	Varias secciones del proyecto reemplazadas, esfuerzos significativos en las intersecciones.
Rehabilitation US504 Lola and La Harpe	2000	2.80	4750	Polipropileno Estructural	Gran agrietamiento y desconchado de la losa de concreto
UTW central Ave. East 119th	1999	3.00	5700	Polipropileno Estructural	Excelente, con algunos parches
UTW intersection Quivira amd 65 th	2000	3.00	14000	Polipropileno Estructural	Buena condición, esfuerzos mínimos

Fuente: Barman & Hansen, (2018)

CAPÍTULO VI: MÉTODOS DE DISEÑO Y EVALUACIÓN DE COSTOS DE PRODUCCIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO FIBROREFORZADOS

6.1. Métodos de diseño de losas de concreto reforzadas con fibras

Según varias investigaciones consultadas, se pudo observar que para el diseño del espesor de las losas de concreto reforzado con fibras para pavimentos hidráulicos, se usa metodologías de diseño como AASHTO 93 y PCA, sin embargo, estas metodologías de diseño no consideran la incorporación de fibras en su procedimiento. Es de conocimiento que ambas metodologías involucran a un mismo parámetro, el módulo de rotura (MR), el cual es obtenido mediante ensayos a flexión; por lo que estas investigaciones diseñan con el valor del módulo de rotura obtenido del concreto con incorporación de fibras, al ser este valor mayor que el módulo de rotura del concreto sin fibras, se obtiene un menor espesor de losa que el calculado para losas de concreto convencionales sin incorporación de fibras.

Por ejemplo, Aureliano (2018) en su investigación realiza el cálculo del espesor tanto de una losa de concreto patrón como de una losa de concreto con fibras de acero de un pavimento rígido, mediante la metodología AASHTO 93. Para el diseño uso los parámetros de diseño del estudio de un pavimento rígido realizado en el centro poblado el Milagro Distrito de Huanchaco, en la ciudad de Trujillo.

En el diseño de ambos pavimentos, de la Tabla N° 16 y la Tabla N° 17, se observa que la principal diferencia son los resultados obtenidos a los 28 días de los ensayos a flexión del concreto realizados en esta investigación, dando un módulo de rotura del concreto patrón de 44 kg/cm² equivalente a 625 psi y en el caso del concreto reforzado con fibras de acero incrementando a 65 kg/cm² equivalente a 925 psi. En el diseño se obtuvo un espesor de losa de concreto sin fibras de 23 cm y utilizando el concreto con fibras de acero, con una dosificación de 20 kg/m³, se reduce el espesor a 17cm.

Tabla N° 16: Cálculo del espesor de la losa de concreto con el método AASHTO 93

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO - MÉTODO AASHTO 1993			
1. Requisitos del Diseño			
			20 (De acuerdo al tráfico proyectado que tienen tránsito mayor de 1,000,000 EE en el carril y por recomendación de la guía AASTHO)
a. Periodo de Diseño (años)			3.00e+06 (Valor obtenido de acuerdo al tránsito que circula en la carretera evaluada)
b. Número de ejes equivalentes total (w18)			4.3 (Capacidad del pavimento de servir al tránsito que circula por la vía donde 0 significa una calificación de intransitable y 5 una calificación de excelente para el tránsito vehicular)
c. Serviciabilidad inicial (pi)			2.5 (Capacidad del pavimento de servir al tránsito que circula por la vía donde 0 significa una calificación de intransitable y 5 una calificación de excelente para el tránsito vehicular)
d. Serviciabilidad final (pf)			85% (Probabilidad de desempeño de acuerdo al tipo de camino)
e. Factor de Confiabilidad (r)			-1.036
Standard Normal Deviation (zr)			0.35 (Factor de seguridad que equivale a incrementar en una proporción el tránsito previsto a lo largo del periodo de diseño)
Overall Standard Deviation (so)			
2. Propiedades de los Materiales			
a. Resistencia a la Compresión del Concreto fc (kg/cm²)			320 (Valor de resistencia a compresión del concreto sin aditivos)
Resistencia a la Compresión del Concreto fc (psi)			4,541.93
b. Módulo de Elasticidad del Concreto Ec (psi)			3,841,447.50
c. Módulo de Rotura s'c (psi)			625.00 (Valor de resistencia a flexión del concreto sin aditivos)
d. Módulo de Reacción de la subrasante- k (pci)			515.75 (Valor que se obtiene a partir del estudio de CBR)
e. Transferencia de Carga (j)			3.8 (Valor que expresa la capacidad de la estructura como transmisora de cargas)
			0.85 (Valor que se obtiene a partir de la evaluación de la caracterización del material y su calidad de drenaje esto correlacionado con el grado de exposición de la estructura a niveles de humedad próximos a la saturación)
f. Coeficiente de Drenaje (cd)			
3. Cálculo del Espesor de losa (Variar D Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Cálculo)			
D (pulgadas)	G_t	N18 NOMINAL	N18 CÁLCULO
9.200	-0.22185	6.48	6.48
4. Estructuración del Pavimento			
a. Espesor de losa requerido (df), pulgadas			9
b. Espesor de losa requerido (df), centímetros			23
c. Espesor de sub base (sb), pulgadas			7
d. Espesor de sub base (sb), centímetros			18

Fuente: Aureliano (2018)

Tabla N° 17: Cálculo del espesor de la losa de concreto con fibras de acero con el método AASHTO
93

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO - MÉTODO AASHTO 1993			
1. Requisitos del Diseño			
	20 (De acuerdo al tránsito proyectado que tienen tránsito mayor de 1,000,000 EE en el carril y por recomendación de la guía AASTHO)		
a. Periodo de Diseño (años)	3.00e+06 (Valor obtenido de acuerdo al tránsito que circula en la carretera evaluada)		
b. Número de ejes equivalentes total (w18)	4.3 (Capacidad del pavimento de servir al tránsito que circula por la vía donde 0 significa una calificación de intransitable y 5 una calificación de excelente para el tránsito vehicular)		
c. Serviciabilidad inicial (pi)	2.5 (Capacidad del pavimento de servir al tránsito que circula por la vía donde 0 significa una calificación de intransitable y 5 una calificación de excelente para el tránsito vehicular)		
d. Serviciabilidad final (pf)	85% (Probabilidad de desempeño de acuerdo al tipo de camino)		
e. Factor de Confiabilidad (r)	-1.036		
Standard Normal Deviation (zr)	0.35 (Factor de seguridad que equivale a incrementar en una proporción el tránsito previsto a lo largo del periodo de diseño)		
Overall Standard Deviation (so)			
2. Propiedades de los Materiales			
a. Resistencia a la Compresión del Concreto f _c (kg/cm ²)	365 (Valor de resistencia a compresión del concreto con aditivos)		
Resistencia a la Compresión del Concreto f _c (psi)	5,180.63		
b. Módulo de Elasticidad del Concreto E _c (psi)	4,102,667.73		
c. Módulo de Rotura s' _c (psi)	925.00 (Valor de resistencia a flexión del concreto con aditivos)		
d. Módulo de Reacción de la subrasante- k (pci)	515.75 (Valor que se obtiene a partir del estudio de CBR)		
e. Transferencia de Carga (j)	3.8 (Valor que expresa la capacidad de la estructura como transmisora de cargas)		
f. Coeficiente de Drenaje (cd)	0.85 (Valor que se obtiene a partir de la evaluación de la caracterización del material y su calidad de drenaje esto correlacionado con el grado de exposición de la estructura a niveles de humedad próximos a la saturación)		
3. Cálculo del Espesor de losa (Variar D Requerido hasta que N18 Nominal = N18 Cálculo)			
D (pulgadas)	G_t	N18 NOMINAL	N18 CÁLCULO
7.150	-0.22185	6.48	6.48
4. Estructuración del Pavimento			
a. Espesor de losa requerido (df), pulgadas	7		
b. Espesor de losa requerido (df), centímetros	17		
c. Espesor de sub base (sb), pulgadas	7		
d. Espesor de sub base (sb), centímetros	18		

Fuente: Aureliano (2018)

Por otro lado, también hemos observado que se están usando softwares para determinar el espesor de las losas de los pavimentos hidráulicos, los cuales involucran en su diseño la incorporación de fibras. Los diferentes proveedores de fibras manejan softwares de diseño para definir una óptima relación entre el espesor de la losa y la dosis de la fibra a incorporar en función de los requerimientos de cada proyecto.

6.1.1. Metodología de diseño con el software PAVE 2008

PAVE 2008 es un software empleado por la empresa Maccaferri, el cual diseña losas de concreto reforzado con fibras de acero. El software realiza cálculos a través del método elástico, metodología Yield Line Theory y la mecánica de la fractura no lineal (NLFM). El criterio general de diseño de las metodologías mencionadas se basa en la verificación del espesor de la losa, la cual está sujeta a parámetros como capacidad portante del suelo, geometría, características del material y de las cargas aplicadas que pueden ser lineales, puntuales, distribuidas, sistemas de estanterías, montacargas, camiones, etc.

A continuación, se detalla el procedimiento que se debe considerar en el uso del software, para verificar si el espesor propuesto cumple con las restricciones.

En primer lugar, como se observa en la Figura N° 29, se configura en la pestaña herramientas: el idioma, el método a emplear para el diseño de los espesores de las losas, las unidades y los códigos según las normativas de cada país donde se emplee el software. Las metodologías de diseño se diferencian por el análisis, algunas se analizan a nivel de capacidad de cargas últimas (Método elasto – plástico como NLFM, el Yield Line Method del TR34/3 y el ACI 360 R-06) y otras a nivel de esfuerzos admisibles (Método elástico según Wastergard).

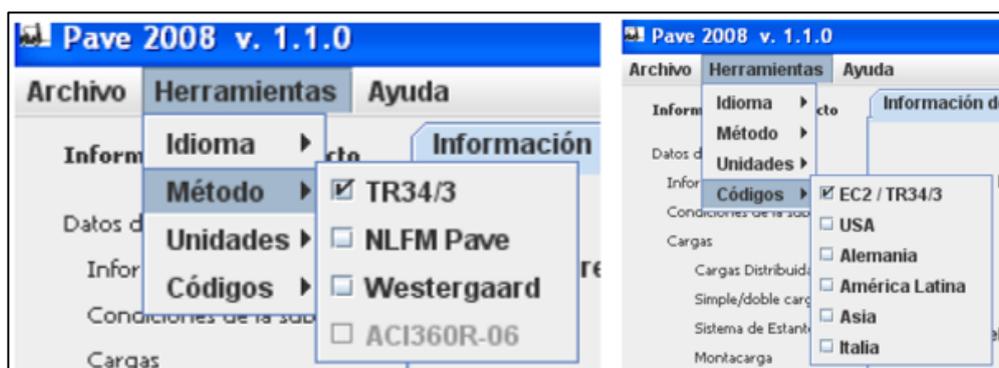


Figura N° 29: Métodos de diseños del espesor de losa y códigos empleados en PAVE 2008

Fuente: MACCAFERRI, (2015)

Se procede a llenar la información del proyecto, para poder identificarlo adecuadamente, colocando datos como el nombre del proyecto, autor del diseño, ubicación del proyecto, contratista, cliente, observaciones, fecha y área total del proyecto.

Ya identificado el proyecto, se introducen los datos para el diseño, en la pestaña de datos de entrada, la cual se subdivide en subpestañas de información del sistema, condiciones de subrasante y carga. En la subpestaña de información del sistema se coloca datos como el espesor de la losa a verificar (se propone un valor), la resistencia del concreto a compresión y flexión (basados en la norma europea UNI EN 206), el coeficiente de Poisson, la dimensión de losas (predimensionamiento entre juntas), el factor de encogimiento, la gradiente de temperatura, el coeficiente de fricción, la forma de construcción (con juntas o sin juntas) y el tipo de fibra y su dosificación. En la Figura N° 30 se observa que para este proyecto se utiliza fibras de acero Wirand con una dosificación de 25 kg/m³.

Información del Proyecto		Datos de Entrada		Verificación ELU		Verificación ELS	
Informaciones del Sistema				Condiciones de la subrasante		Cargas	
Espesor de la Losa	h	150	mm	Módulo de sección	W_c	3750	mm ³ /mm
Clase del Concreto		C 25/30		Módulo de Young	E_c	31476	MPa
				Módulo de Rotura	$f_{ctk,R}$	3.60	MPa
					f_{ck}	25	MPa
					f_{cu}	30	MPa
Coeficiente de Poisson	ν	0.20		Factor de Encogimiento	ϵ_{sh}	0.40	%
Espaciamiento entre juntas	L_x	5.00	m	Área del Paño		25	m ²
Espaciamiento entre juntas	L_y	5.00	m	Relación de Aspecto		1.00	
Gradiente de Temperatura	ΔT	0.00	°C	Coef. de Temperatura	α_T	0.000012	1/K
Coeficiente de Fricción	μ	0.5					
Construcción <input type="radio"/> Sin juntas <input checked="" type="radio"/> Con juntas de control							
Fibra de Acero Wirand®		FF1		Dosificación		25	kg/m ³
Fibra de PP Fibromac®		0		Dosificación		0	g/m ³
						Re,3	57 %

Figura N° 30: Datos de entrada para verificación del cálculo del espesor de losas de concreto fibroreforzadas en PAVE 2008

Fuente: MACCAFERRI, (2015)

En la subpestaña de condiciones de la subrasante se consideran datos de entrada como el módulo de Wastergaard o módulo de Winkler (reacción de la subbase), módulo de la subbase (módulo de elasticidad del suelo) y California Bearing Ratio (CBR). Posteriormente se procede a la subpestaña de cargas, donde se coloca las cargas solicitadas a las que estarán sometidas las losas de concreto, estas pueden ser cargas distribuidas, simple-doble carga puntual, sistemas de estanterías, montacargas y camiones.

Finalmente, ver la Figura N° 31, se verifican los resultados en las pestañas de verificación ELU (resistencias a flexión y al punzonamiento) y verificación ELS (retracción, temperatura y esfuerzos a flexión). Estas pestañas procesan los datos de entrada por medio del método seleccionado para las verificaciones de las dimensiones y espesor de la losa propuesta. La pestaña de verificación por ELU (estado límite último) en la subpestaña de capacidad a flexión muestra como resultados, los resúmenes de condiciones de carga, las combinaciones más críticas, la capacidad de soporte última y el factor de seguridad global; y en la subpestaña de capacidad al punzonamiento se muestra, el resumen de condiciones de carga, las combinaciones más críticas, la verificación del área de carga y la verificación al perímetro crítico.

Información del Proyecto		Datos de Entrada		Verificación ELU		Verificación ELS	
Capacidad a flexión		Capacidad al punzonado					
Cargas							
Concentrada							
Cargas	Posición	P_u/P_{act}	Juntas	Resultados			
Simple/doble carga puntual	Interior	<input type="text"/>	---	P_{act}	<input type="text"/>	kN	
Sistema de Estanterías	Interior	<input type="text"/>	---	P_{act}	<input type="text"/>	kN	
Montacarga	Interior	4.97	---	P_{act}	33.32	kN	
Camión	Interior	2.86	---	P_{act}	64.00	kN	
Cargas Distribuidas							
Bloque de Carga	Interior	<input type="text"/>	---	q_{act}	<input type="text"/>	kN/m ²	
Línea de Carga	Interior	<input type="text"/>	---	P_{act}	<input type="text"/>	kN/m	
Combinación							
Combinación	Posición	Junta		Resultado			
Camión	Interior	---		P_{Des}	64.00	kN	
Capacidad última de Carga		$P_u - (\Delta P_{SH} + \Delta P_{DT})$		182.89 kN			
Factor de seguridad Global		P_u/P_{Des}		2.86			

Figura N° 31: Verificación ELU en PAVE 2008

Fuente: MACCAFERRI, (2015)

En la Figura N° 32, se observa en la pestaña de verificación ELS (estado límite de servicio), los resultados mostrados en la subpestaña SH (retracción y temperatura) serán la fuerza normal y tensión debido a la contracción de la losa y fricción con la base, resistencia a corto plazo y factor de seguridad; y en la subpestaña de esfuerzos, resumen de las condiciones de carga, restricciones por retracción y temperatura, combinación de carga más crítica, tensión admisible y factor de seguridad global.

Información del Proyecto		Datos de Entrada	Verificación ELU	Verificación ELS
SH Esfuerzos				
Concentrada				
Cargas	Posiciones	Juntas	Resultados	
Simple/doble carga puntual	Interior	---	σ_{act}	<input type="text"/> MPa
Sistema de Estanterías	Interior	---	σ_{act}	<input type="text"/> MPa
Montacarga	Interior	---	σ_{act}	<input type="text" value="1.23"/> MPa
Camión	Interior	---	σ_{act}	<input type="text" value="2.16"/> MPa
Cargas Distribuidas				
Bloque de Carga	Interior	---	σ_{act}	<input type="text"/> MPa
Línea de Carga	Interior	---	$\sigma_{L act}$	<input type="text"/> MPa
Restricción				
	Interior	Borde	Esquina	
Retracción	<input type="text" value="0.61"/> MPa	<input type="text" value="0.31"/> MPa	<input type="text" value="0.00"/> MPa	
Temperatura	<input type="text" value="0.00"/> MPa	<input type="text" value="0.00"/> MPa	<input type="text" value="0.00"/> MPa	
Combinación				
	Posición	Junta	Resultado	
<input type="text" value="2.16"/>	Interior	---	σ_{tot}	<input type="text" value="2.77"/> MPa
+ <input type="text" value="0.61"/>	Camión			
Esfuerzo admisible σ_{adm} <input type="text" value="2.05"/> MPa				
Factor de seguridad Global $\sigma_{adm} / \sigma_{tot}$ <input type="text" value="0.74"/>				

Figura N° 32: Verificación ELS en PAVE 2008

Fuente: MACCAFERRI, (2015)

Finalmente, en la Figura N° 33 se observa un flujograma de la aplicación del software PAVE 2008, la cual muestra que este es una metodología bajo un sistema de procesos iterativos para optimizar los diseños de las losas de concreto reforzados con fibras.

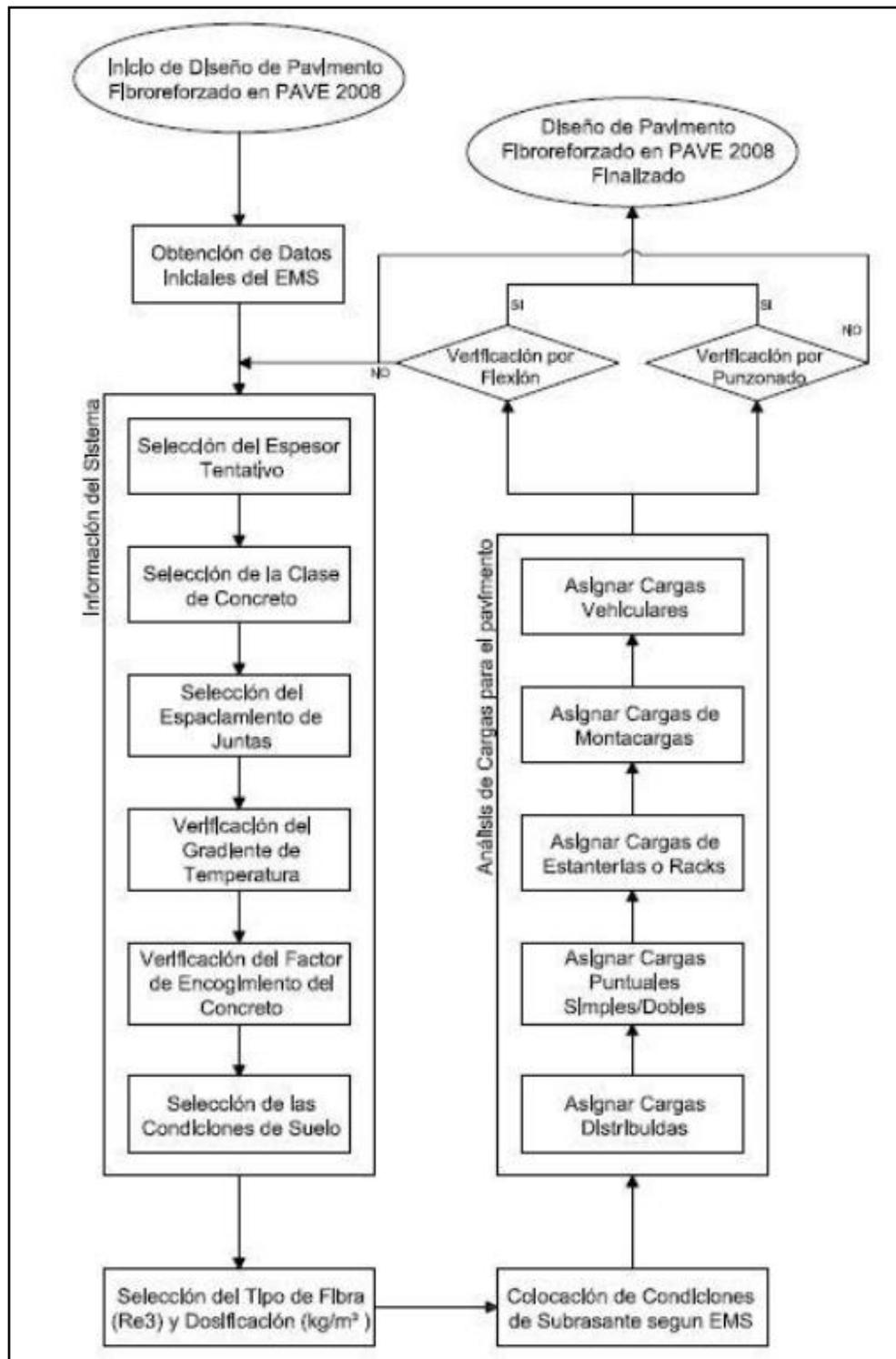


Figura N° 33: Flujograma de procesos de diseño en PAVE 2008

Fuente: Sotil & Zegarra, (2015)

6.2. Evaluación de costos de producción de pavimentos de concreto reforzados con fibras

Miranda & Rado (2019) en su investigación determina los costos de elaboración de un pavimento reforzado con mallas de acero y un pavimento reforzado con fibras de acero. El proyecto tiene un área de 544 m² de, con un espesor de losa de concreto de 30 cm, dando un volumen de concreto de 163.20 m³. En la Tabla N° 18, se obtiene el costo unitario del concreto simple de S/. 408.33

Tabla N° 18: Costo unitario del concreto simple

Partida:	Concreto f _c =210 Kg/cm ²		M5-AC:0.45		Total:	408.33
Rendimiento:	12	m ³ /día	MO: 12	EQ:12		
Descripción del recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Costo Unitario S/.	Parcial S/.	Sub total S/.
Mano de obra						107.92
Capataz	hh	0.10	0.06667	20.20	1.35	
Operario	hh	1.00	0.66667	18.36	12.24	
Oficial	hh	2.00	1.33333	15.39	20.52	
Peón	hh	8.00	5.33333	13.84	73.81	
Materiales						285.68
Aceite de motor	% equipo		2.50	9.34	0.23	
Gasolina	gal		0.15	12.71	1.91	
Cemento portland tipo I (42.5Kg)	bol		8.94	19.49	174.26	
Agua	m ³		0.17	9.23	1.58	
Agregado grueso	m ³		0.25	87.77	21.98	
Agregado fino	m ³		0.41	87.77	35.86	
Super plastificante	lts		3.17	8.50	26.92	
Plastificante retardante	lts		1.79	10.50	18.76	
Incorporador de aire	lts		0.24	17.11	4.19	
Equipos						14.73
Vibrador de concreto 4 HP 1.25"	hm	1.00	0.66667	4.00	2.67	
Mezcladora de concreto de 9p3	hm	1.00	0.66667	10.00	6.67	
Herramientas manuales	%MO		5.00000	107.92	5.40	

Fuente: Miranda & Rado, (2019)

El pavimento tiene 30cm de espesor, y según el Art. 7.9.1 de la Norma E-060 del Reglamento Nacional de Construcciones, el recubrimiento para una losa de concreto hidráulico vaciado contra el suelo es de 7cm, por tanto, el peralte de la losa es de 23cm. Para el metrado de la malla de acero corrugado se tomó las siguientes consideraciones, según el Art. 9.6.1.2 de la Norma 318-14 del ACI, el área mínima de acero en un elemento de concreto armado sometido a flexión, con la finalidad de controlar fisuras y agrietamientos, está dado por el mayor valor entre:

$$A_s \min = \frac{0.8 \sqrt{f'_c} b \cdot d}{f_y} \quad y \quad A_s \min = \frac{14 \cdot b \cdot d}{f_y}$$

Por lo que, para una porción de pavimento de 1m x 1m, se tiene que:

- Ancho: $b = 100\text{cm}$
- Peralte: $d = 30 - 7 = 23\text{cm}$
- Resistencia de diseño: $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$
- Límite de fluencia del acero: $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$

$$As \text{ min} = \frac{0.8 \sqrt{210} (100)(23)}{4,200} = 6.35 \text{ cm}^2 \quad \text{y} \quad As \text{ min} = \frac{14 (100)(23)}{4,200} = 7.66 \text{ cm}^2$$

La cantidad de acero mínimo será de 7.66 cm² de acero por cada metro de pavimento, en cada dirección, esto corresponde a una malla de acero de 4 fierros de 5/8" espaciados cada 25 cm en cada dirección del pavimento, por lo que se obtuvo:

- Longitud de acero = 4 fierros x 1m x 2 direcciones = 8m de fierro de 5/8" cada m²

Se consideró un 5% de desperdicios y un 5% de alambre para amarre de los fierros, por lo que se obtuvo:

- Peso de malla de acero = 8m x (1.552 Kg/m) x 1.05 x 1.05 = 13.69 Kg/m² de pavimento

Finalmente, el peso total de la malla de acero usada en el pavimento de concreto hidráulico es:

- Peso total de acero = (13.69 Kg/m²) x (544 m²) = 7,447.36 Kg

En la Tabla N° 19, se obtiene el costo total de producción de S/. 128,815.32 de un pavimento de concreto hidráulico reforzado con malla de acero de un área de 544 m².

Tabla N° 19: Resumen de costos para la producción de un pavimento con refuerzo convencional

Partida	Unidad	Metrado	Costo Unitario del Recurso			Costo Unitario de recurso	Costo de Partida
			Mano de obra	Materiales	Equipos		
Concreto $f_c=210$ Kg/cm ²	m ³	163.20	107.92	285.68	14.73	408.33	66,639.50
Encofrado y desencofrado	m ²	162.00	33.84	8.59	1.69	44.12	7,147.44
Acero de refuerzo $f_y=4200$ Kg/cm ²	Kg	7,447.36	1.98	3.56	0.10	5.64	42,003.11
Acabado en losa	m ²	544.00	3.84	0.64	1.59	6.07	3,302.08
Curado del concreto	m ²	544.00	1.27	6.43	0.06	7.76	4,221.44
Corte de juntas en el pavimento	m ²	275.00	2.28	3.75	0.90	6.93	1,905.75
Sellado de juntas de contracción	m	275.00	7.69	3.60	0.23	11.52	3,168.00
Sellado de juntas de dilatación	m	25.00	7.69	9.20	0.23	17.12	428.00
Costo del pavimento (S/.)							128,815.32

Fuente: Miranda & Rado, (2019)

De acuerdo la investigación de Miranda & Rado (2019), se obtuvo un máximo incremento de la resistencia a flexión de 39 a 51.1 kg/cm², al incorporar una dosificación de 30 kg/m³ de fibras de acero, por lo que se considera esta dosificación para determinar el análisis de costos de producción del pavimento reforzado con fibras de acero. En la Tabla N° 20 se observa que se tiene un costo de S/. 3.90 por kilo de fibra de acero, con lo que se obtuvo un costo unitario del concreto con fibras de acero de S/. 525.33, para una dosificación de fibras de acero de 30 kg/m³.

Tabla N° 20: Costo unitario del concreto con fibras de acero con una dosificación de 30 kg/m³.

Partida:	Concreto $f_c=210$ Kg/cm ² con fibras metálicas		M8-A30-AC: 0.45		Total:	525.33
Rendimiento:	12 m ³ /día	MO: 12	EQ:12			
Descripción del recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Costo Unitario S/.	Parcial S/.	Sub total S/.
Mano de obra						107.92
Capataz	hh	0.10	0.06667	20.20	1.35	
Operario	hh	1.00	0.66667	18.36	12.24	
Oficial	hh	2.00	1.33333	15.39	20.52	
Peon	hh	8.00	5.33333	13.84	73.81	
Materiales						402.68
Aceite de motor	% equipo		2.50	9.34	0.23	
Gasolina	gal		0.15	12.71	1.91	
Cemento portland tipo I (42.5Kg)	bol		8.94	19.49	174.26	
Agua	m ³		0.17	9.23	1.58	
Agregado grueso	m ³		0.25	87.77	21.98	
Agregado fino	m ³		0.41	87.77	35.86	
Super plastificante	lts		3.17	8.50	26.92	
Plastificante retardante	lts		1.79	10.50	18.76	
Incorporador de aire	lts		0.24	17.11	4.19	
Fibra metálica	Kg		30.00	3.90	117.00	
Equipos						14.73
Vibrador de concreto 4 HP 1.25"	hm	1.00	0.66667	4.00	2.67	
Mezcladora de concreto de 9p3	hm	1.00	0.66667	10.00	6.67	
Herramientas manuales	%MO		5.00000	107.92	5.40	

Fuente: Miranda & Rado, (2019)

En la Tabla N° 21 se obtiene el costo total de producción de S/. 105,906.61 de un pavimento de concreto hidráulico reforzado con fibras de acero de un área de 544 m².

Tabla N° 21: Resumen de costos para la producción de un pavimento reforzado con fibras de acero

Partida	Unidad	Metrado	Costo Unitario del Recurso			Costo Unitario de recurso	Costo de Partida
			Mano de obra	Materiales	Equipos		
Concreto $f_c=210$ Kg/cm ² con fibras de acero	m ³	163.20	107.92	402.68	14.73	525.33	85,733.90
Encofrado y desencofrado	m ²	162.00	33.84	8.59	1.69	44.12	7,147.44
Acabado en losa	m ²	544.00	3.84	0.64	1.59	6.07	3,302.08
Curado del concreto	m ²	544.00	1.27	6.43	0.06	7.76	4,221.44
Corte de juntas en el pavimento	m ²	275.00	2.28	3.75	0.90	6.93	1,905.75
Sellado de juntas de contracción	m	275.00	7.69	3.60	0.23	11.52	3,168.00
Sellado de juntas de dilatación	m	25.00	7.69	9.20	0.23	17.12	428.00
Costo del pavimento (S/.)							105,906.61

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de comparación se ha elaborado un presupuesto para el mismo pavimento, considerando la dosificación de fibra de polipropileno propuesta en la investigación de Chilon (2018), de acuerdo a esta investigación, en los resultados de los ensayos a flexión del concreto se obtuvo un máximo incremento del módulo de rotura de 56.69 hasta 60.51 kg/cm², al incorporar una dosificación de 2 kg/m³ de macrofibras de polipropileno Sika® Fiber Force PP-48.

Como se observa en la Tabla N° 22, se ha considerado un costo de S/. 30.00 por kilo de fibra de polipropileno, con lo que se obtuvo el costo unitario del concreto con fibras de polipropileno de S/. 468.33, con una dosificación de fibra de 2 kg/m³.

Tabla N° 22: Costo unitario del concreto con fibras de polipropileno con una dosificación de 2 kg/m³

Partida:		Concreto $f_c=210$ Kg/cm ² con fibras de polipropileno				Total:	
Rendimiento:		12 m ³ /día	MO: 12	EQ:12			
Descripcion del recurso		Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Costo Unitario S/.	Parcial S/.	Sub total S/.
Mano de obra							107.92
	Capataz	hh	0.10	0.06667	20.20	1.35	
	Operario	hh	1.00	0.66667	18.36	12.24	
	Oficial	hh	2.00	1.33333	15.39	20.52	
	Peon	hh	8.00	5.33333	13.84	73.81	
Materiales							345.68
	Aceite de motor	% equipo		2.50	9.34	0.23	
	Gasolina	gal		0.15	12.71	1.91	
	Cemento portland tipo I (42.5Kg)	bol		8.94	19.49	174.26	
	Agua	m ³		0.17	9.23	1.58	
	Agregado grueso	m ³		0.25	87.77	21.98	
	Agregado fino	m ³		0.41	87.77	35.86	
	Super plastificante	lts		3.17	8.50	26.92	
	Plastificante retardante	lts		1.79	10.50	18.76	
	incorporador de aire	lts		0.24	17.11	4.19	
	Fibra de polipropileno	Kg		2.00	30.00	60.00	
Equipos							14.73
	Vibrador de concreto 4 HP 1.25"	hm	1.00	0.66667	4.00	2.67	
	Mezcladora de concreto de 9p3	hm	1.00	0.66667	10.00	6.67	
	Herramientas manuales	%MO		5.00000	107.92	5.40	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N° 23, se ha obtenido un costo total de producción de s/. 96,604.21 de un pavimento de concreto hidráulico reforzado con fibras de polipropileno de un área de 544 m².

Tabla N° 23: Resumen de costos para la producción de un pavimento reforzado con fibras de polipropileno

Partida	Unidad	Metrado	Costo Unitario del Recurso			Costo Unitario de recurso	Costo de Partida
			Mano de obra	Materiales	Equipos		
Concreto $f_c=210$ Kg/cm ² con fibra de polipropileno	m ³	163.20	107.92	345.68	14.73	468.33	76,431.50
Encofrado y desencofrado	m ²	162.00	33.84	8.59	1.69	44.12	7,147.44
Acabado en losa	m ²	544.00	3.84	0.64	1.59	6.07	3,302.08
Curado del concreto	m ²	544.00	1.27	6.43	0.06	7.76	4,221.44
Corte de juntas en el pavimento	m ²	275.00	2.28	3.75	0.90	6.93	1,905.75
Sellado de juntas de contracción	m	275.00	7.69	3.60	0.23	11.52	3,168.00
Sellado de juntas de dilatación	m	25.00	7.69	9.20	0.23	17.12	428.00
Costo del pavimento (S/.)							96,604.21

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los costos obtenidos en la Tabla N° 24, y solo en forma referencial, la construcción de pavimentos hidráulicos reforzados con fibras de acero genera un ahorro del 18% del costo respecto a los pavimentos hidráulicos reforzados con malla de acero; para los pavimentos hidráulicos reforzados con fibras de polipropileno, el ahorro es del 25% del costo. La reducción del costo se debe principalmente al reemplazo de la malla de acero corrugado por fibras de acero o fibras de polipropileno, para el control de fisuras y grietas por flexión.

Tabla N° 24: Resumen de comparación de costos de producción de pavimentos rígidos

Tipo de Pavimento	Costo Total	Costo Unitario por m2	Relación de costo	Ahorro de costo
Pavimento rígido reforzado con malla de acero	S/. 128,815.32	S/. 237.00	100 %	-
Pavimento rígido reforzado con fibras de acero, en una dosificación de 30 kg/m3	S/. 105,906.61	S/. 195.00	82 %	18 %
Pavimento rígido reforzado con fibras de polipropileno, en una dosificación de 2 kg/m3	S/. 96,604.21	S/: 178.00	75 %	25 %

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VII: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

7.1. Clasificación de la información de las investigaciones consultadas

Con la finalidad de analizar el comportamiento de la resistencia a flexión de un concreto reforzado con fibras de acero y fibras de polipropileno para pavimentos rígidos, se han recopilado resultados, a los 28 días, del ensayo de resistencia a flexión de un concreto reforzado con fibras de 31 investigaciones nacionales y 13 investigaciones internacionales. Las investigaciones contienen resultados de un total de 72 ensayos (FRC). En la Tabla N° 25 se muestra la cantidad de ensayos según el tipo de fibra incorporada a la mezcla de concreto. Además, las fibras varían en marca, características geométricas, resistencia a tracción, módulo de elasticidad y dosificación incorporada a la mezcla de concreto.

Tabla N° 25: Cantidad total de ensayos de resistencia a flexión del concreto con fibras de acero y polipropileno realizados por las investigaciones consultadas

Tipo de Fibra	N° Ensayos (FRC)
Acero	48
Polipropileno	24
Total	72

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla N° 26 se ha clasificado las fibras de polipropileno usadas por las investigaciones consultadas, según la funcionalidad de las fibras, es decir en macrofibras o microfibras de polipropileno.

Tabla N° 26: Cantidad de macrofibras y microfibras de polipropileno utilizadas por las investigaciones consultadas

Tipo de Fibra de Polipropileno	N° ensayos (FRC)
Macrofibras	12
Microfibras	12
Total	24

Fuente: Elaboración Propia

En las Figuras N° 34 y N° 35 se han identificado las marcas de fibras acero y polipropileno utilizadas en las investigaciones nacionales consultadas.

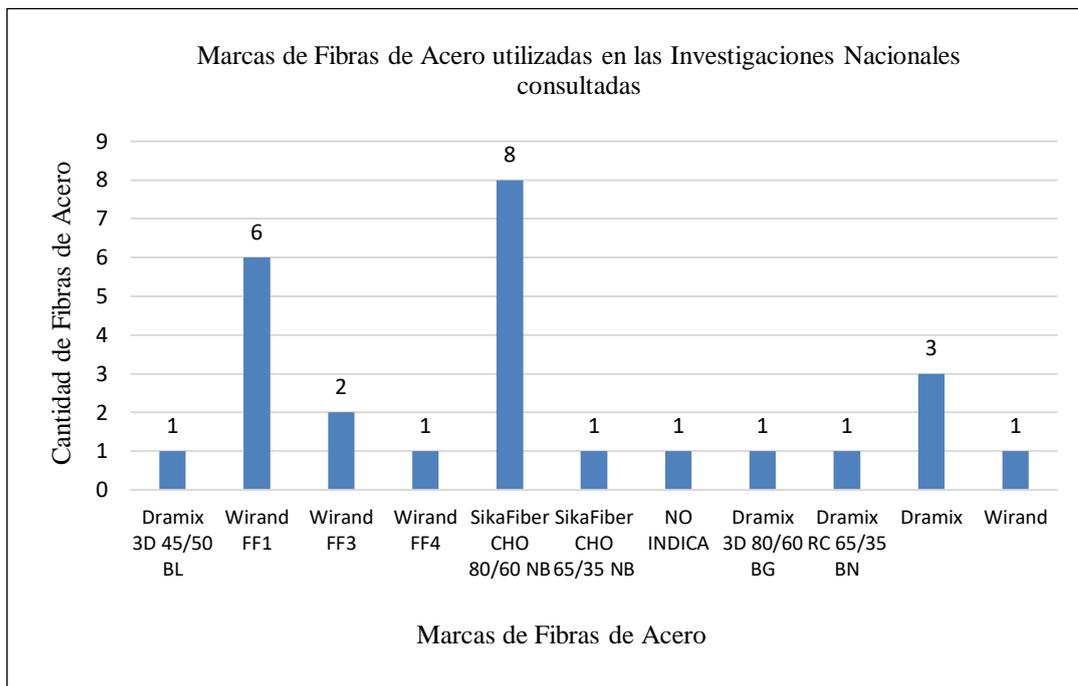


Figura N° 34: Marcas de fibras de acero utilizadas en las investigaciones nacionales consultadas

Fuente: Elaboración propia

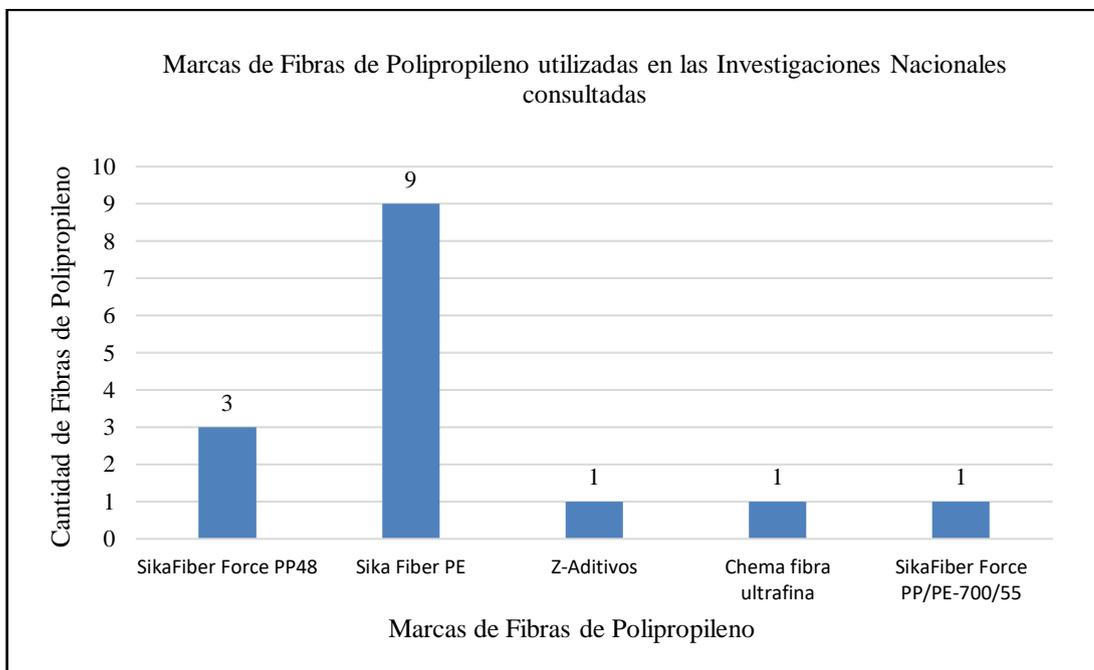


Figura N° 35: Marcas de fibras de polipropileno utilizadas en las investigaciones nacionales consultadas

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras N° 36 y N° 37 se han identificado las marcas de fibras acero y polipropileno utilizadas en las investigaciones a nivel internacional.

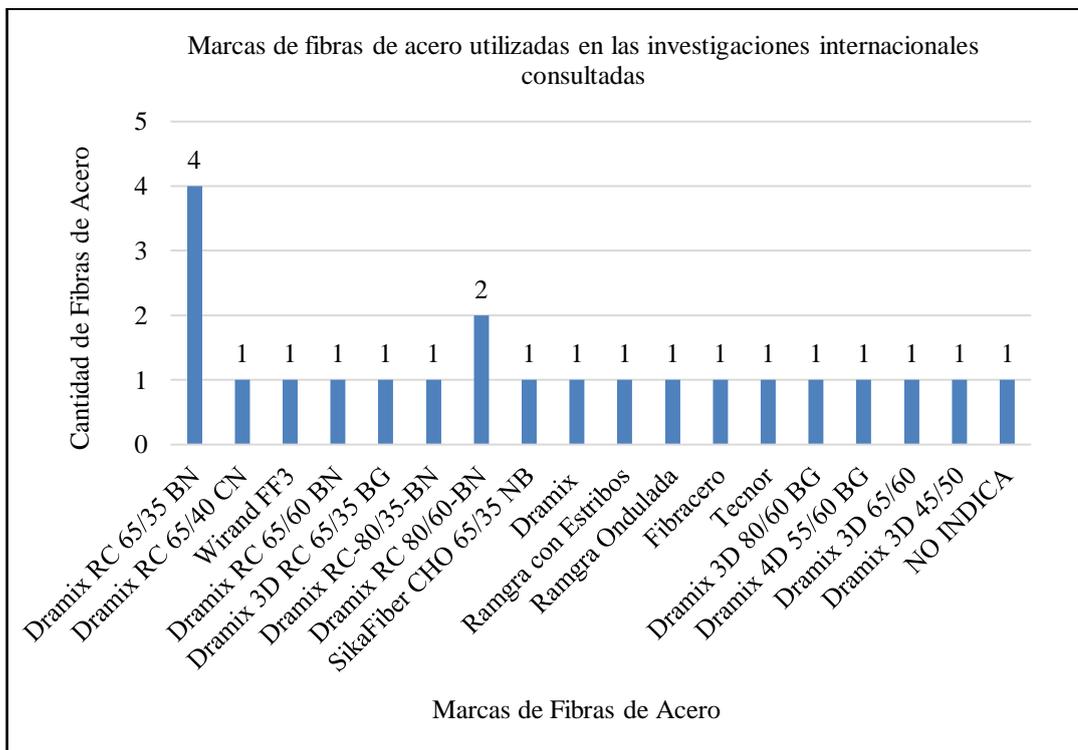


Figura N° 36: Marcas de fibras de acero utilizadas en las investigaciones internacionales consultadas
Fuente: Elaboración propia

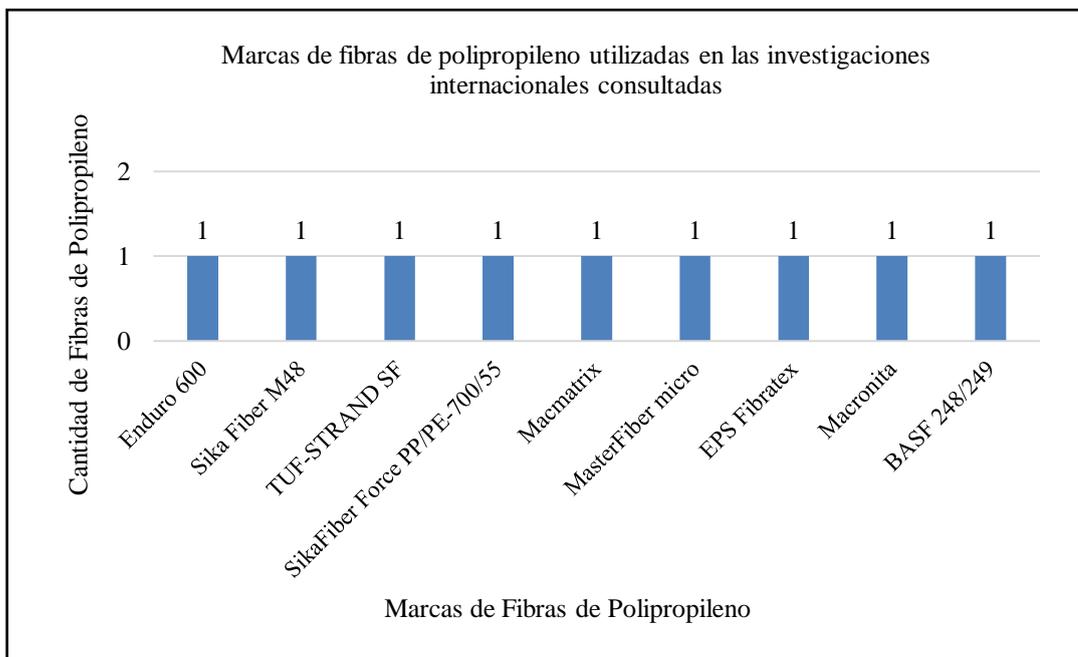


Figura N° 37: Marcas de fibras de polipropileno utilizadas en las investigaciones internacionales consultadas
Fuente: Elaboración propia

7.2. Presentación y análisis de resultados de resistencia a la flexión del concreto hidráulico vs. la dosificación de fibra, obtenidos de investigaciones nacionales e internacionales

7.2.1. Concreto hidráulico reforzado con fibras de acero

Múltiples investigaciones han demostrado que la resistencia a flexión del concreto incrementa cuando se le adiciona fibras de acero; estas investigaciones han realizado sus ensayos con concretos de diferentes resistencias a compresión, $f'_c = 210, 245$ y 280 Kg/cm^2 en su mayor parte. La Figura N° 38 muestra los resultados de la resistencia a flexión de acuerdo a la dosificación de fibra, puede observarse que para cualquier f'_c de concreto, existe una tendencia a incrementar de la resistencia a flexión del concreto a medida que se incrementa la dosificación de la fibra. Además se observa que las tendencias de estas 3 líneas, crecen casi en la misma proporción a medida que se incrementa la dosificación de fibra. Esto quiere decir que el f'_c del concreto si bien contribuye en la resistencia a flexión inicial del concreto, no obstante el incremento de esta resistencia a flexión ($\Delta\% \text{ MR}$) dependerá posteriormente de la dosificación de fibra que se adicione.

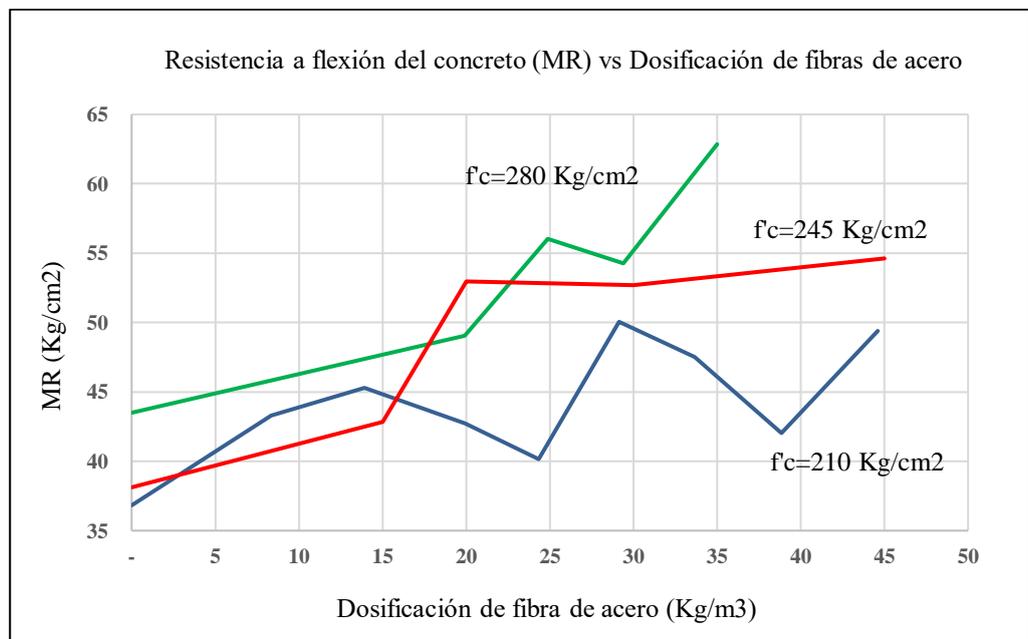


Figura N° 38: Resistencia a flexión del concreto vs. Dosificación de fibras de acero según la resistencia de diseño f'_c

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, para independizar los resultados de la resistencia a compresión del concreto, tomaremos como variable dependiente al incremento de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\% MR$), el cual es adimensional, y dependerá solo de la dosificación de fibra.

La Tabla N° 27 y Tabla N° 28 muestran los resultados del incremento porcentual en la resistencia a flexión ($\Delta\% MR$) de los ensayos realizados con concreto reforzado con fibras de acero, en función de la dosificación de fibras de acero adicionada. El incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto, viene dado por:

$$\Delta\%MR = \left(\frac{MR \text{ concreto con fibras}}{MR \text{ concreto sin fibras}} - 1 \right) \times 100\%$$

Las dosificaciones de fibras de acero han variado entre 7.10 hasta 60 Kg/m³, tomado en base al peso de fibra por cada m³ de concreto hidráulico producido en cada investigación.

Tabla N° 27: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con fibras de acero

Número de ensayo	MR concreto sin fibras (Kg/cm ²)	MR concreto con fibras (Kg/cm ²)	Dosificación de fibras de acero (Kg/m ³)	$\Delta\% MR$
FRC1	46.42	47.36	7.10	2.02%
FRC21	34.39	41.25	8.45	19.95%
FRC8	41.00	44.75	10.00	9.15%
FRC21	34.39	46.20	12.68	34.34%
FRC1	46.42	55.93	14.20	20.49%
FRC15	44.39	50.48	15.00	13.72%
FRC25	31.69	35.67	15.00	12.54%
FRC41	28.65	35.18	15.00	22.79%
FRC23	34.97	37.78	19.20	8.04%
FRC9	26.64	28.21	20.00	5.89%
FRC19	34.00	40.00	20.00	17.65%
FRC20	43.30	47.60	20.00	9.93%
FRC26	40.00	50.00	20.00	25.00%
FRC40	36.81	45.17	20.00	22.71%
FRC41	28.65	38.34	20.00	33.82%
FRC5	37.19	43.41	20.00	16.72%
FRC6	37.19	44.84	20.00	20.56%
FRC61	48.00	55.00	20.00	14.58%

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 28: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con fibras de acero

Número de ensayo	MR concreto sin fibras (Kg/cm ²)	MR concreto con fibras (Kg/cm ²)	Dosificación de fibras de acero (Kg/m ³)	Δ% MR
FRC7	47.50	55.00	20.00	15.79%
FRC72	48.00	57.00	20.00	18.75%
FRC69	25.59	39.16	20.00	53.03%
FRC8	41.00	46.04	20.00	12.29%
FRC70	25.59	34.16	20.00	33.49%
FRC1	46.42	56.67	21.30	22.08%
FRC23	34.97	39.88	24.00	14.04%
FRC24	43.10	52.53	24.00	21.87%
FRC20	43.30	52.70	25.00	21.71%
FRC25	31.69	38.62	25.00	21.87%
FRC41	28.65	36.00	25.00	25.65%
FRC5	37.19	47.59	25.00	27.96%
FRC6	37.19	56.76	25.00	52.62%
FRC61	48.00	60.00	25.00	25.00%
FRC7	47.50	60.00	25.00	26.32%
FRC45	44.48	49.65	28.00	11.62%
FRC46	44.48	49.52	28.00	11.33%
FRC1	46.42	54.63	28.39	17.69%
FRC23	34.97	37.89	28.80	8.35%
FRC35	37.61	54.53	29.00	44.99%
FRC15	44.39	52.70	30.00	18.72%
FRC20	43.30	58.00	30.00	33.95%
FRC52	42.67	48.33	30.00	13.26%
FRC8	41.00	53.41	30.00	30.27%
FRC44	45.12	51.17	30.00	13.41%
FRC25	31.69	42.59	35.00	34.41%
FRC61	48.00	69.00	35.00	43.75%
FRC7	47.50	69.00	35.00	45.26%
FRC69	25.59	36.91	40.00	44.24%
FRC35	37.61	58.77	43.00	56.27%
FRC15	44.39	54.62	45.00	23.05%
FRC25	31.69	48.30	45.00	52.42%
FRC8	41.00	54.07	45.00	31.88%
FRC4	32.00	44.13	48.00	37.91%
FRC9	26.64	34.64	50.00	30.03%
FRC62	25.59	27.16	60.00	6.14%
FRC63	38.24	40.18	60.00	5.07%

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 29 muestra una distribución estadística de los resultados obtenidos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero ($\Delta\%MR$). La dosificación de fibra es una variable continua, por lo que se realiza una distribución por intervalos, donde la marca de clase es el promedio de los valores que caen dentro del intervalo. Los resultados del incremento porcentual promedio de la resistencia a flexión ($\Delta\%MR$ promedio) tienen una desviación estándar en cada intervalo de dosificación de fibra, los cuales servirán posteriormente para establecer una función de tendencia más conservadora con los resultados del incremento porcentual mínimo de la resistencia a flexión ($\Delta\%MR$ mínimo), la cual viene dado por:

$$\Delta\%MR \text{ mínimo} = \Delta\%MR \text{ promedio} - \text{Desviación estándar}$$

Tabla N° 29: Distribución por intervalos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero

Intervalo de dosificación (Kg/m3)	Dosificación de fibras de acero (Kg/m3)	$\Delta\% MR$ promedio	Desviación estándar	$\Delta\% MR$ mínimo
[5 a 15>	10.49	17%	12%	5%
[15 a 25>	19.69	20%	11%	9%
[25 a 35>	27.48	24%	12%	12%
[35 a 45>	37.60	45%	8%	37%
[45 a 55>	46.60	35%	11%	24%
[55 a 60]	60.00	6%	1%	5%

Fuente: Elaboración propia

La Figura N° 39 muestra los resultados obtenidos del $\Delta\%MR$ promedio de la Tabla N° 29 respecto a la dosificación de fibra de acero, donde puede observarse claramente que existe una relación directa, la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$) incrementa a medida que se incrementa la dosificación de fibra de acero; sin embargo a partir de una dosificación de 37 Kg/m3, los resultados comienzan a disminuir, debido a que el concreto presenta problemas en su trabajabilidad así como en la distribución de fibras en la matriz de concreto, formando “erizos” es decir acumulaciones de fibra, que distorsionan los resultados. Por lo tanto, los resultados obtenidos indican que la máxima dosificación de fibra de acero que permite obtener resultados confiables es de 37 Kg/m3.

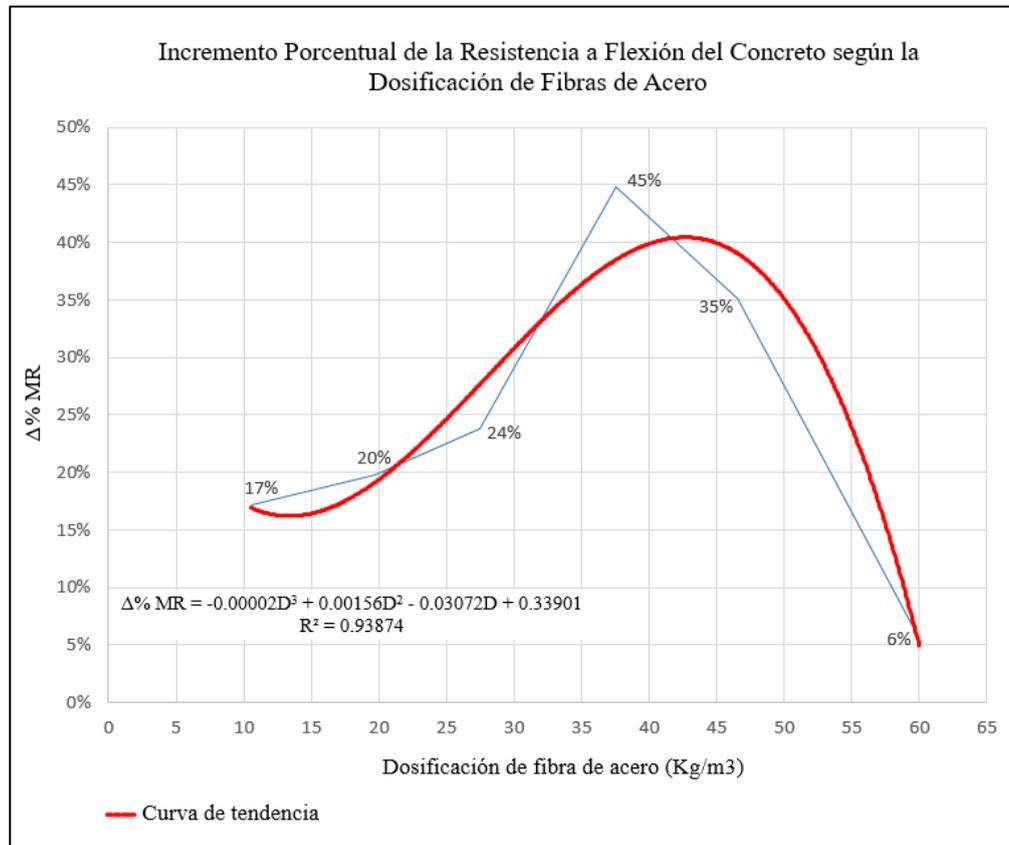


Figura N° 39: Incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de fibras de acero

Fuente: Elaboración propia

Se procedió a generar una curva de tendencia o regresión al conjunto de resultados obtenidos, usando el método de los mínimos cuadrados; obteniendo el siguiente resultado:

$$\Delta\%MR = -0.00002D^3 + 0.00156D^2 - 0.03072D + 0.33901$$

- El coeficiente de correlación $R=0.9689$ indica que existe una correlación muy alta entre la variable independiente “dosificación de fibra de acero” y la variable dependiente “incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto”, lo que puede evidenciarse con la función de regresión, que permite calcular el valor promedio del $\Delta\%MR$ en función de los valores de la dosificación de fibra de acero.

- El coeficiente de determinación $R^2=93.87\%$ indica que los resultados de la variable dependiente (incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto), están determinados en un 93.87% por la variable independiente (la dosificación de fibras de acero), y un 6.13% dependen de otros factores.

La Figura N° 40 muestra las curvas de tendencia del incremento porcentual de la resistencia a flexión promedio ($\Delta\%MR$ promedio), así como los resultados más conservadores ($\Delta\%MR$ mínimo) respecto a la dosificación de fibras de acero. Se consideran dosificaciones de fibras de acero de por lo menos 20 kg/m³, que es lo recomendado por los fabricantes.

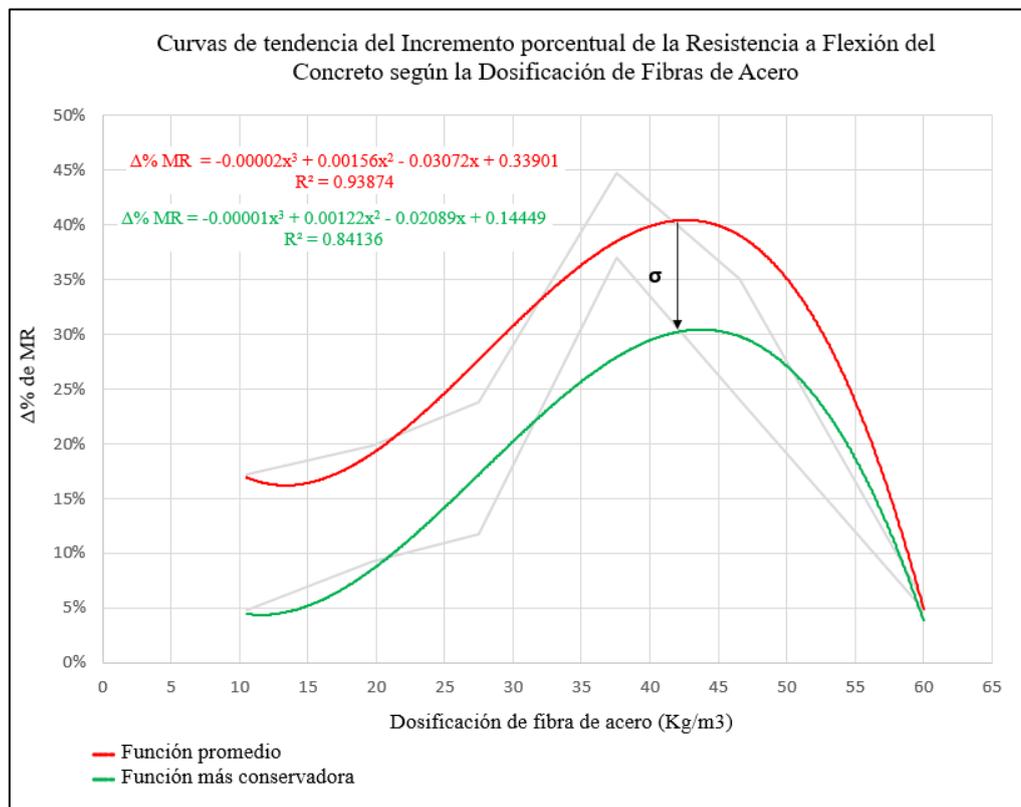


Figura N° 40: Curvas de tendencia del incremento porcentual de la resistencia flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de fibras de acero

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo los criterios de simplificación, se procedió a proponer gráficas que permitan determinar de forma sencilla, el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico reforzado con fibras de acero ($\Delta\%MR$) en función de la dosificación de fibras (D). En la Figura N° 41 se propone un modelo simplificado para la función promedio y la función más conservadora, con los siguientes resultados:

La función promedio, está definida por:

- Tramo A-B:

Dosificación de fibra de acero: $20 \text{ Kg/m}^3 < D < 37 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = D \times 1\%$

- Tramo B-C:

Dosificación de fibra de acero: $37 \text{ Kg/m}^3 < D < 47 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = 37\%$

La función más conservadora, está definida por:

- Tramo A'-B':

Dosificación de fibra de acero: $20 \text{ Kg/m}^3 < D < 37 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = (D - 10) \times 1\%$

- Tramo B'-C':

Dosificación de fibra de acero: $37 \text{ Kg/m}^3 < D < 47 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = 27\%$

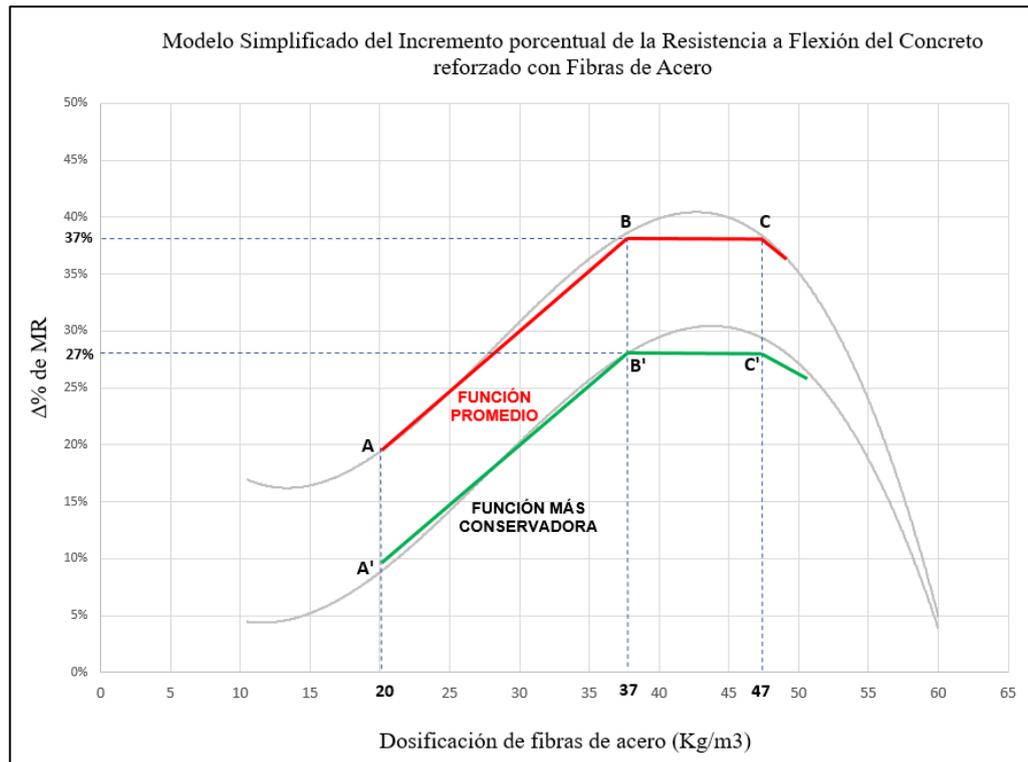


Figura N° 41: Modelo simplificado del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero

Fuente: Elaboración propia

En base a lo desarrollado, se observó que:

- Existe una alta correlación entre el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto respecto a la dosificación de fibras de acero que se le adicione.
- El máximo incremento porcentual de la resistencia la flexión del concreto con fibras de acero será del 37% como promedio, y del 27% en forma conservadora, lo que se logra con dosificaciones de fibra de acero entre 37 Kg/m³ a 47 Kg/m³.
- La mínima dosificación de fibras de acero corresponderá con la sugerida por los fabricantes de este insumo, y que corresponde a 20 Kg/m³.
- La máxima dosificación de fibras de acero recomendada en esta investigación es de 37 Kg/m³, ya que valores superiores a esa dosificación ya no logran un mayor incremento porcentual en la resistencia a flexión del concreto.

- Dosificaciones de fibras de acero mayores a 47 Kg/m³, traen una reducción en el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto, la que puede ser explicada por problemas de trabajabilidad de la mezcla, así como por la formación de erizos de fibras que forman poros en la matriz del concreto.

7.2.2. Concreto hidráulico reforzado con macrofibras de polipropileno

Múltiples investigaciones han demostrado que la resistencia flexión del concreto se incrementa cuando se le adiciona macrofibras de polipropileno; estas investigaciones han realizado sus ensayos con concretos de diferentes resistencias a compresión, $f'_c = 210$ Kg/cm² en su mayor parte, y en una pequeña proporción con $f'_c = 245, 250$ y 280 Kg/cm². Se ha independizado los resultados de la resistencia a compresión del concreto, tomando como variable dependiente al incremento de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\% MR$), el cual es adimensional, y dependerá solo de la dosificación de fibra.

La Tabla N° 30 muestra los resultados del incremento porcentual en la resistencia a flexión ($\Delta\% MR$) de los ensayos realizados con concreto reforzado con macrofibras de polipropileno, en función de la dosificación de macrofibras de polipropileno adicionada. El incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto, viene dado por:

$$\Delta\%MR = \left(\frac{MR \text{ concreto con fibras}}{MR \text{ concreto sin fibras}} - 1 \right) \times 100\%$$

Las dosificaciones de macrofibras de polipropileno han variado entre 1.73 Kg/m³ hasta 10 Kg/m³, tomado en base al peso de fibra por cada m³ de concreto hidráulico producido en cada investigación.

Tabla N° 30: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con macrofibras de polipropileno

Número de ensayo	MR concreto sin fibras (Kg/cm ²)	MR concreto con fibras (Kg/cm ²)	Dosificación de macrofibras de polipropileno (Kg/m ³)	Δ% MR
FRC53	42.67	44.00	1.73	3.12%
FRC10	26.64	27.20	2.00	2.10%
FRC13	56.59	60.51	2.00	6.93%
FRC43	45.12	46.63	2.00	3.35%
FRC29	70.85	75.83	3.00	7.03%
FRC 65	34.00	40.02	3.00	17.71%
FRC29	70.85	82.54	4.00	16.50%
FRC38	48.54	55.47	4.00	14.28%
FRC39	48.54	52.20	4.00	7.54%
FRC10	26.64	27.60	5.00	3.60%
FRC38	48.54	52.20	5.00	7.54%
FRC58	34.00	39.00	5.00	14.71%
FRC66	34.00	44.87	5.00	31.97%
FRC10	26.64	30.88	7.00	15.92%
FRC42	28.65	32.33	8.00	12.84%
FRC58	34.00	41.00	8.00	20.59%
FRC10	26.64	32.85	9.00	23.31%
FRC66	34.00	36.91	10.00	8.56%

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 31 muestra una distribución estadística de los resultados obtenidos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno (Δ%MR). La dosificación de fibra (Kg/m³) es una variable continua, por lo que se realiza una distribución por intervalos, donde la marca de clase es el promedio de los valores que caen dentro del intervalo. Los resultados de Δ%MR tienen una desviación estándar en cada intervalo de dosificación de fibra, los cuales servirán posteriormente para establecer una función de tendencia más conservadora con los resultados del incremento porcentual mínimo de la resistencia a flexión (Δ%MR mínimo), la cual viene dado por:

$$\Delta\%MR \text{ mínimo} = \Delta\%MR \text{ promedio} - \text{Desviación estándar}$$

Tabla N° 31: Distribución por intervalos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno

Intervalo de dosificación (Kg/m3)	Dosificación de macrofibras de polipropileno (Kg/m3)	$\Delta\%$ MR promedio	Desviación estándar	$\Delta\%$ MR mínimo
[1 a 3>	1.93	4%	2%	2%
[3 a 5>	3.60	13%	5%	8%
[5 a 7>	5.00	18%	13%	6%
[7 a 9>	7.67	16%	4%	13%
[9 a 10]	9.50	16%	10%	6%

Fuente: Elaboración propia

La Figura N° 42 muestra el incremento porcentual promedio de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%$ MR promedio) respecto a la dosificación de macrofibras de polipropileno adicionada, se observa que hay un incremento de la resistencia hasta dosificaciones de 5.00 Kg/m3, y valores superiores a esta dosificación no logran incrementar más la resistencia a la flexión del concreto.

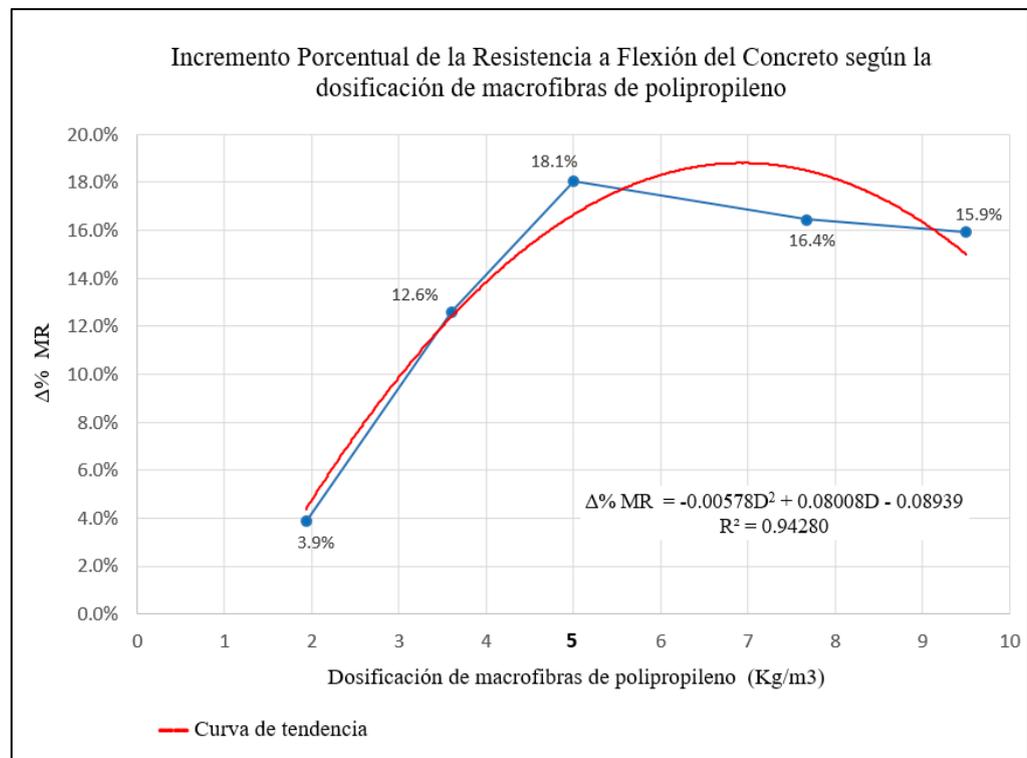


Figura N° 42: Incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%$ MR) según la dosificación de macrofibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

Se procedió a generar una curva de tendencia o regresión al conjunto de resultados obtenidos, usando el método de los mínimos cuadrados; obteniendo el siguiente resultado:

$$\Delta\%MR = -0.00578D^2 + 0.08008D - 0.08939$$

Se obtuvo un coeficiente de correlación $R=0.9710$, lo que evidencia una correlación muy alta entre la variable independiente y dependiente. Asimismo, el coeficiente de determinación $R^2=94.28\%$ indica que los resultados de la variable dependiente ($\Delta\%MR$) están determinados en un 94.28% por la variable independiente, la dosificación de macrofibras de polipropileno (D), y solo el 5.72% de los valores del $\Delta\%MR$ están determinados por otras variables diferentes.

La Figura N° 43 presenta la función promedio del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$ promedio) y además la función más conservadora ($\Delta\%MR$ mínimo) de la misma variable, según la dosificación de macrofibras de polipropileno. Se consideran dosificaciones de macrofibras de polipropileno de por lo menos 2 kg/m³, que es lo recomendado por los fabricantes.

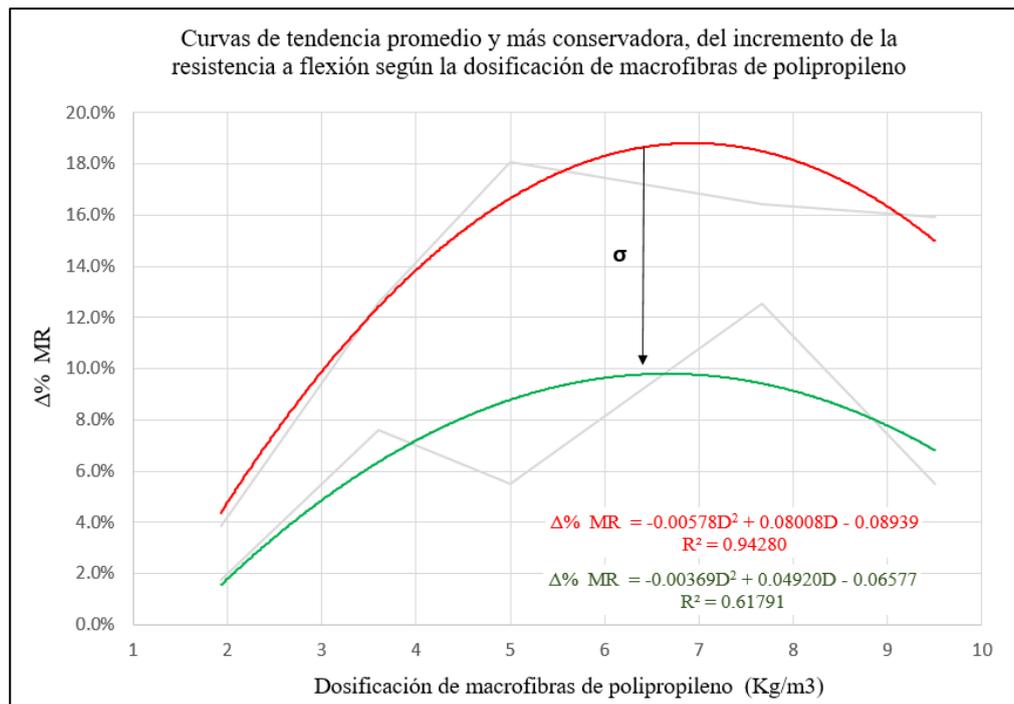


Figura N° 43: Curvas de tendencia del incremento porcentual de la resistencia flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de macrofibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo los criterios de simplificación, en la Figura N° 44 se ha propuesto un modelo simplificado de la función promedio y de la función más conservadora, los cuales permiten determinar de forma sencilla, el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico reforzado con macrofibras de polipropileno ($\Delta\%MR$) en función de la dosificación de fibras (D), se obtuvieron los siguientes resultados:

La función promedio, está definida por:

- Tramo A-B:

Dosificación de macrofibras de polipropileno: $2 \text{ Kg/m}^3 < D < 5 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = (D - 1) \times 4.5\%$

- Tramo B-C:

Dosificación de macrofibras de polipropileno: $5 \text{ Kg/m}^3 < D < 7.80 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = 18\%$

La función conservadora, está definida por:

- Tramo A'-B'

Dosificación de macrofibras de polipropileno: $2 \text{ Kg/m}^3 < D < 5 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto:

$$\Delta\%MR = (D - 1) \times 2.25\%$$

- Tramo B'-C'

Dosificación de macrofibras de polipropileno: $5 \text{ Kg/m}^3 < D < 7.80 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = 9\%$

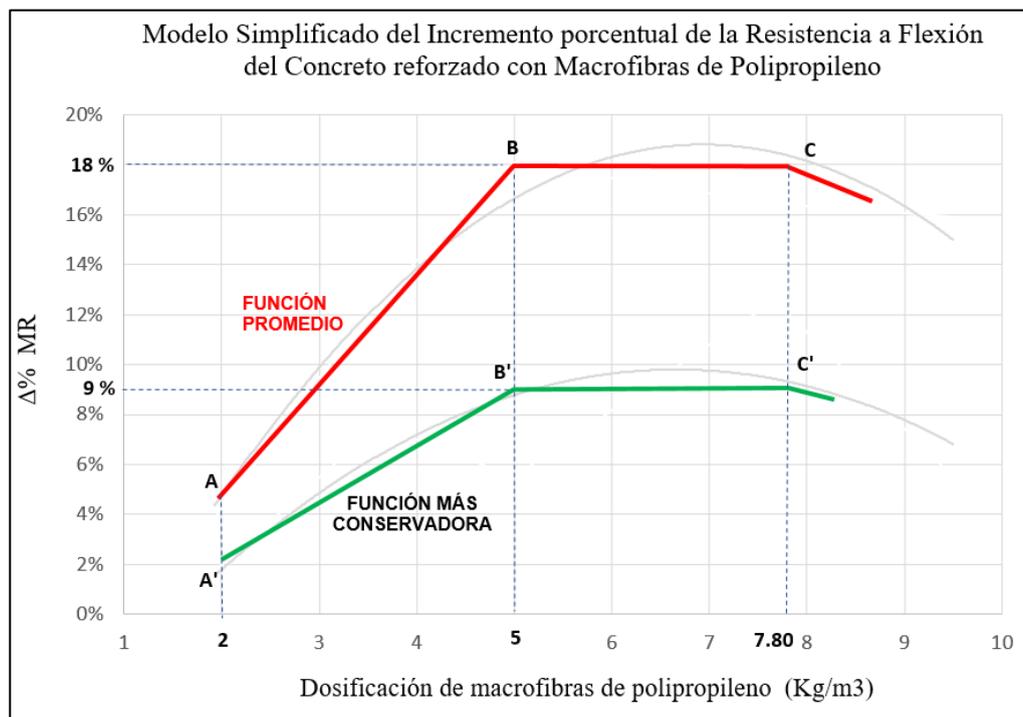


Figura N° 44: Modelo simplificado del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos, se observó que:

- Existe una alta correlación entre el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto respecto a la dosificación de macrofibras de polipropileno que se le adicione.

- El máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto con macrofibras de polipropileno es del 18% como promedio, y del 9% en forma conservadora, lo que se logra con dosificaciones de macrofibras de polipropileno entre 5 Kg/m³ a 7.80 Kg/m³.
- La mínima dosificación de macrofibras de polipropileno corresponderá con la sugerida por los fabricantes de este insumo, y que corresponde a 2 Kg/m³.
- La dosificación óptima de macrofibras de polipropileno recomendada en esta investigación es de 5 Kg/m³, ya que valores superiores a esa dosificación ya no logran un mayor incremento porcentual en la resistencia a flexión del concreto.
- Dosificaciones de macrofibras de polipropileno mayores a 7.80 Kg/m³, traen una reducción en el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto, la que puede ser explicada por problemas de trabajabilidad de la mezcla, así como por la formación de erizos de fibras que forman poros en la matriz del concreto.

7.2.3. Concreto hidráulico reforzado con microfibras de polipropileno

Algunas investigaciones han realizado ensayos de resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno, demostrado en su caso particular de investigación, que la resistencia a flexión del concreto se incrementa cuando se le adiciona microfibras de polipropileno. Estas investigaciones han realizado sus ensayos con concretos de diferentes resistencias a compresión, $f'_c = 210$ Kg/cm² en su mayor parte, y en una pequeña proporción con $f'_c = 250$ y 280 Kg/cm². Se ha independizado los resultados de la resistencia a compresión del concreto, tomando como variable dependiente al incremento de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%$ MR), el cual es adimensional, y dependerá solo de la dosificación de fibra.

La Tabla N° 32 muestra los resultados del incremento porcentual en la resistencia a flexión ($\Delta\%$ MR) de los ensayos realizados con concreto reforzado con microfibras de polipropileno, en función de la dosificación de microfibras de polipropileno adicionada. El incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto, viene dado por:

$$\Delta\%MR = \left(\frac{MR \text{ concreto con fibras}}{MR \text{ concreto sin fibras}} - 1 \right) \times 100\%$$

Las dosificaciones de microfibras de polipropileno han variado entre 0.20 Kg/m³ hasta 1.30 Kg/m³, tomado en base al peso de fibra por cada m³ de concreto hidráulico producido en cada investigación.

Tabla N° 32: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión en concretos reforzados con microfibras de polipropileno

Número de ensayo	MR concreto sin fibras (Kg/cm ²)	MR concreto con fibras (Kg/cm ²)	Dosificación de microfibras de polipropileno (Kg/m ³)	$\Delta\%$ MR
FRC18	41.66	43.43	0.20	4.25%
FRC16	48.30	50.20	0.30	3.93%
FRC17	48.30	50.10	0.30	3.73%
FRC64	34.41	35.78	0.30	3.98%
FRC14	44.39	47.75	0.40	7.57%
FRC18	41.66	47.53	0.40	14.09%
FRC16	48.30	57.00	0.50	18.01%
FRC17	48.30	52.90	0.50	9.52%
FRC12	44.84	48.05	0.60	7.16%
FRC14	44.39	48.40	0.60	9.03%
FRC27	36.70	43.50	0.60	18.53%
FRC30	28.65	32.66	0.60	14.00%
FRC54	32.24	33.89	0.60	5.12%
FRC55	31.56	33.26	0.60	5.39%
FRC64	34.41	36.11	0.60	4.94%
FRC16	48.30	60.70	0.70	25.67%
FRC17	48.30	57.80	0.70	19.67%
FRC14	44.39	49.41	0.80	11.31%
FRC64	34.41	39.52	0.90	14.85%
FRC54	32.24	35.06	1.20	8.75%
FRC28	31.97	33.89	1.30	6.01%

Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 33 muestra una distribución estadística de los resultados obtenidos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno ($\Delta\%MR$). La dosificación de fibra (Kg/m^3) es una variable continua, por lo que se realiza una distribución por intervalos, donde la marca de clase es el promedio de los valores que caen dentro del intervalo. Los resultados de $\Delta\%MR$ tienen una desviación estándar en cada intervalo de dosificación de fibra, los cuales servirán posteriormente para establecer una función de tendencia más conservadora con los resultados del incremento porcentual mínimo de la resistencia a flexión ($\Delta\%MR$ mínimo), la cual viene dado por:

$$\Delta\%MR \text{ mínimo} = \Delta\%MR \text{ promedio} - \text{Desviación estándar}$$

Tabla N° 33: Distribución por intervalos del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno

Intervalo de dosificación (Kg/m³)	Dosificación de microfibras de polipropileno (Kg/m³)	$\Delta\% MR$ promedio	Desviación estándar	$\Delta\% MR$ mínimo
[0.2 a 0.4>	0.28	4.0%	0.2%	3.8%
[0.4 a 0.6>	0.45	12.3%	4.7%	7.6%
[0.6 a 0.8>	0.62	12.2%	7.6%	4.5%
[0.8 a 1.0>	0.85	13.1%	2.5%	10.6%
[1.0 a 1.3]	1.25	7.4%	1.9%	5.4%

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 45 se observó que el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno, tiende a incrementar hasta dosificaciones de fibra de 0.45 Kg/m^3 , alcanzando un incremento porcentual promedio de la resistencia a flexión del concreto del 12 % ($\Delta\%MR$ promedio).

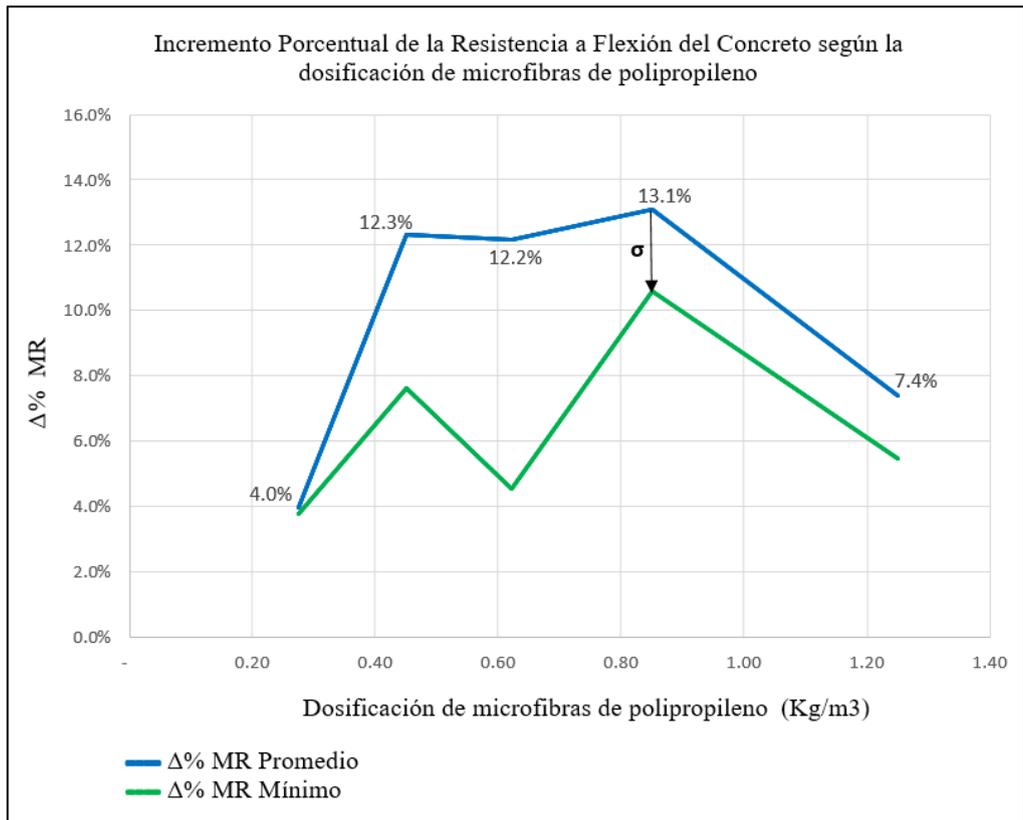


Figura N° 45: Incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto ($\Delta\%MR$) según la dosificación de microfibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 46 se ha modelado funciones simples que permiten determinar el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico reforzado con microfibras de polipropileno ($\Delta\%MR$) en función a la dosificación de fibras (D), se obtuvieron los siguientes resultados:

La función promedio, está definida por:

- Tramo A-B:

Dosificación de microfibras de polipropileno: $0.3 < D < 0.45 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto:

$$\Delta\%MR = (47D - 9) \times 1\%$$

- Tramo B-C:

Dosificación de microfibras de polipropileno $0.45 < D < 0.90 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto $\Delta\%MR = 12\%$

La función conservadora, está definida por:

- Tramo A'-B'

Dosificación de microfibras de polipropileno: $0.3 < D < 0.45 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = (27D - 4) \times 1\%$

- Tramo B'-C'

Dosificación de microfibras de polipropileno: $0.45 < D < 0.90 \text{ Kg/m}^3$

Incremento de la resistencia a flexión del concreto: $\Delta\%MR = 8\%$

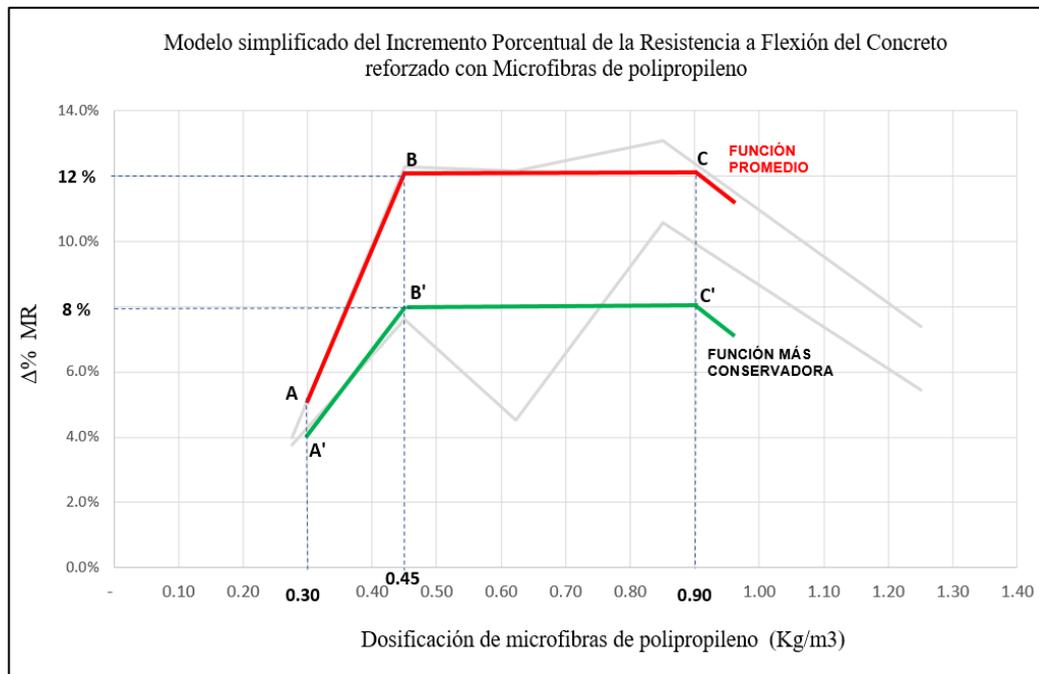


Figura N° 46: Modelo simplificado del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados obtenidos, se observó que:

- El máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto con microfibras de polipropileno es del 12% como promedio, y del 8% en forma conservadora, lo que se logra con dosificaciones de microfibras de polipropileno entre 0.45 a 0.90 Kg/m³.
- La mínima dosificación de microfibras de polipropileno corresponderá con la sugerida por los fabricantes de este insumo, y que corresponde a 0.30 Kg/m³.
- La dosificación óptima de microfibras de polipropileno recomendada en esta investigación es de 0.45 Kg/m³, ya que a partir de esos niveles ya no se logra mayor incremento porcentual en la resistencia a flexión del concreto.
- Dosificaciones de microfibras de polipropileno mayores a 0.90 Kg/m³, traen una reducción en el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto, la que puede ser explicada por problemas de trabajabilidad de la mezcla, así como por la formación de erizos de fibras que forman poros en la matriz del concreto.

7.3. Contratación de hipótesis

7.3.1. Contratación de hipótesis específica N° 01

Hipótesis específica N° 01: “La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero incrementa hasta un 30%”

Para esta prueba se consideró los resultados de los ensayos en donde se obtuvo el máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto, y que corresponde a dosificaciones de fibras de acero en el rango de 37 Kg/m³ a 47 Kg/m³. Tomando este rango de dosificaciones, en la Figura N° 47 se obtuvo los siguientes resultados para la variable $\Delta\%MR$, mediante la función promedio:

$$\Delta\%MR = -0.00002D^3 + 0.00156D^2 - 0.03072D + 0.33901$$

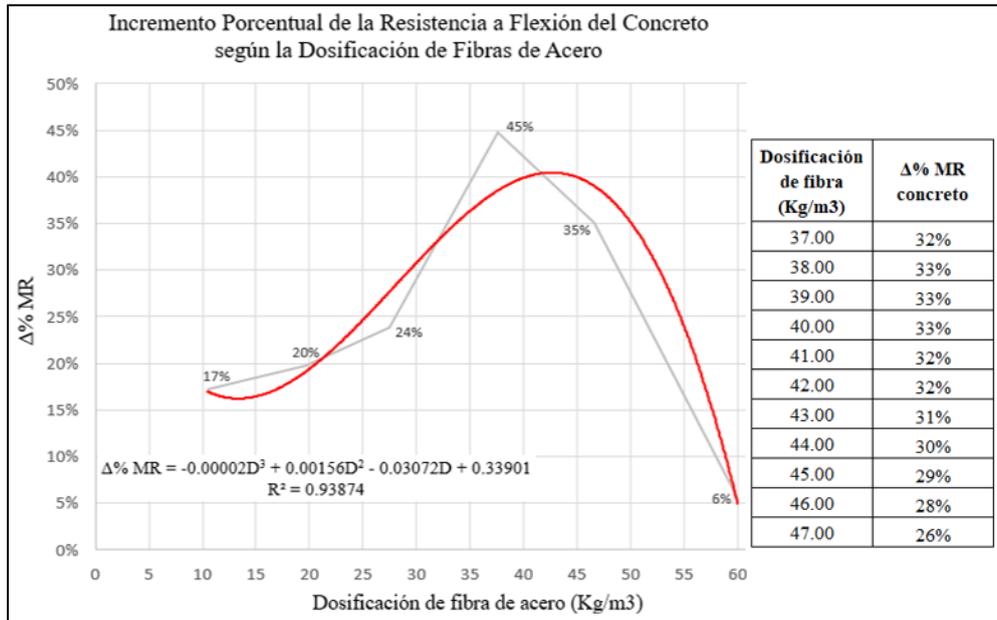


Figura N° 47: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero mediante la función promedio

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero ($\Delta\%MR$), se determinó lo siguiente:

- Número de datos: $n = 11$
- Media de la muestra: $\bar{X} = 30.93\%$
- Desviación estándar de la muestra: $s = 2.14 \%$

Para la contratación de hipótesis se planteó lo siguiente:

- Hipótesis nula: $H_0: \mu \geq 30\%$

“La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero incrementa más del 30%”

- Hipótesis alterna: $H_1: \mu < 30\%$

“La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero incrementa hasta un 30%”

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

- Grados de libertad: $gl = n-1 = 10$

Se determinó el valor del punto crítico mediante el uso de la Tabla N° 34:

- Punto crítico: $t(n-1, \alpha) = -1.812$ (una cola hacia la izquierda)

Tabla N° 34: Valor crítico de la distribución t de Student para la hipótesis específica N° 01

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN t DE STUDENT						
α	0.01	0.015	0.02	0.025	0.05	0.1
1	31.821	21.205	15.895	12.706	6.314	3.078
2	6.965	5.643	4.849	4.303	2.920	1.886
3	4.541	3.896	3.482	3.182	2.353	1.638
4	3.747	3.298	2.999	2.776	2.132	1.533
5	3.365	3.003	2.757	2.571	2.015	1.476
6	3.143	2.829	2.612	2.447	1.943	1.440
7	2.998	2.715	2.517	2.365	1.895	1.415
8	2.896	2.634	2.449	2.306	1.860	1.397
9	2.821	2.574	2.398	2.262	1.833	1.383
10	2.764	2.527	2.359	2.228	1.812	1.372
11	2.718	2.491	2.328	2.201	1.796	1.363
12	2.681	2.461	2.303	2.179	1.782	1.356

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó la prueba estadística t de Student debido a que la muestra $n < 30$, y la varianza poblacional es desconocida:

$$t_p = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}} = \frac{30.93\% - 30\%}{2.14\%/\sqrt{11}} = 1.44$$

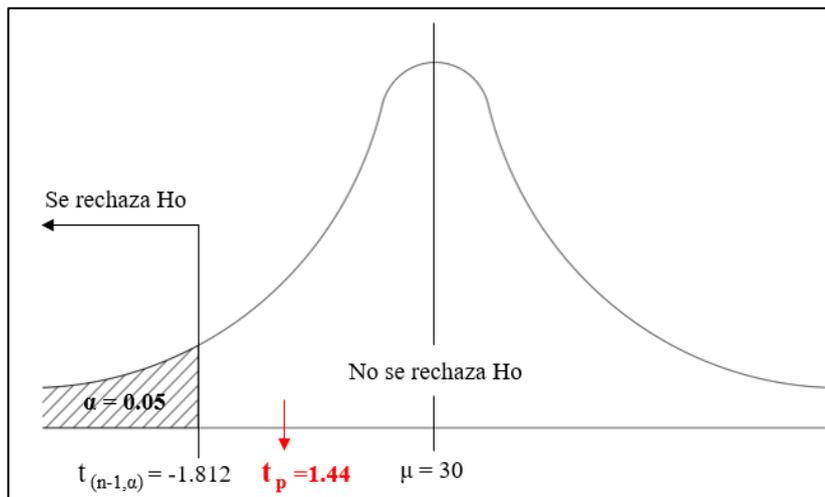


Figura N° 48: Contrastación de la hipótesis específica N° 01

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura N° 48, $t_p > t(n-1, \alpha)$; por lo tanto no se rechaza H_0 y se concluye, con un nivel de significancia del 5% que los datos no revelan evidencia suficiente para rechazar que el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto con fibras de acero es mayor al 30%, tal como se comprueba en los resultados de esta investigación, donde se obtiene un incremento porcentual máximo de la resistencia a flexión del concreto de hasta el 37%.

7.3.2. Contrastación de hipótesis específica N° 02

Hipótesis específica N° 02: “La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno incrementa hasta un 10%”.

Macrofibras de polipropileno:

Para esta prueba se consideró los resultados de los ensayos en donde se obtuvo el máximo incremento porcentual de resistencia a flexión del concreto, y que corresponde a dosificaciones de macrofibras de polipropileno en el rango de 5.00 Kg/m³ a 7.80 Kg/m³. Tomando este rango de dosificaciones, en la Figura N° 49 se obtuvo los siguientes resultados para la variable $\Delta\%MR$ mediante la función promedio:

$$\Delta\%MR = -0.00578D^2 + 0.08008D - 0.08939$$

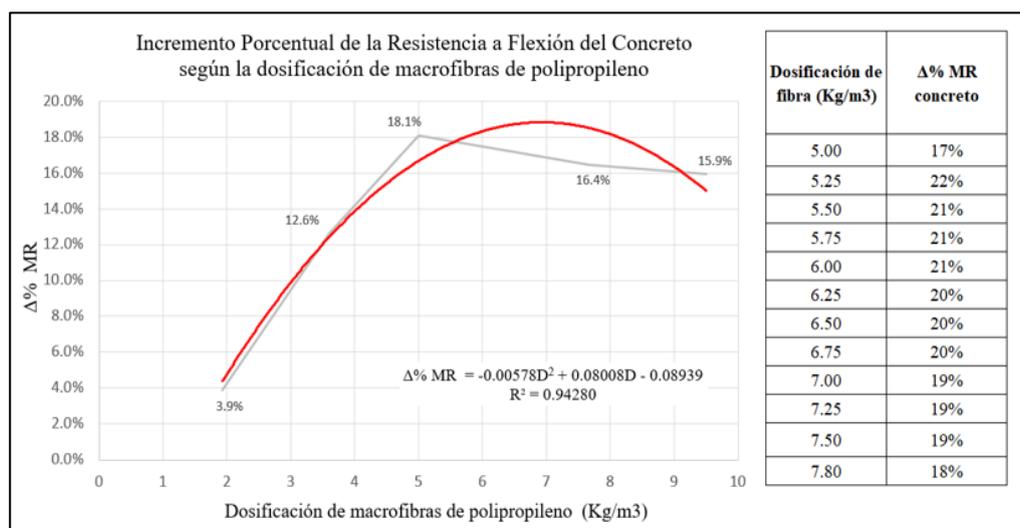


Figura N° 49: Cálculo del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno mediante la función promedio

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno ($\Delta\%MR$), se determinó lo siguiente:

- Número de datos: $n = 12$
- Media de la muestra: $\bar{X} = 19.76\%$
- Desviación estándar de la muestra: $s = 1.43\%$

Para la contrastación de hipótesis se ha planteado lo siguiente:

- Hipótesis nula: $H_0: \mu \geq 10\%$

“La resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno incrementa más del 10%”

- Hipótesis alterna: $H_1: \mu < 10\%$

“La resistencia a flexión del concreto reforzado con macrofibras de polipropileno incrementa hasta un 10%”

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Grados de libertad: $gl = n-1 = 11$

Se determinó el valor del punto crítico mediante el uso de la Tabla N° 35:

- Punto crítico: $t(n-1, \alpha) = -1.796$ (cola hacia la izquierda)

Tabla N° 35: Valor crítico de la distribución t de Student para la hipótesis específica N° 02

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN t DE STUDENT							
α	0.01	0.015	0.02	0.025	0.05	0.1	
Grados de libertad	1	31.821	21.205	15.895	12.706	6.314	3.078
	2	6.965	5.643	4.849	4.303	2.920	1.886
	3	4.541	3.896	3.482	3.182	2.353	1.638
	4	3.747	3.298	2.999	2.776	2.132	1.533
	5	3.365	3.003	2.757	2.571	2.015	1.476
	6	3.143	2.829	2.612	2.447	1.943	1.440
	7	2.998	2.715	2.517	2.365	1.895	1.415
	8	2.896	2.634	2.449	2.306	1.860	1.397
	9	2.821	2.574	2.398	2.262	1.833	1.383
	10	2.764	2.527	2.359	2.228	1.812	1.372
	11	2.718	2.491	2.328	2.201	1.796	1.363
	12	2.681	2.461	2.303	2.179	1.782	1.356

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó la prueba estadística t de Student debido a que la muestra $n < 30$, y la varianza poblacional es desconocida:

$$t_p = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}} = \frac{19.76\% - 10\%}{1.43\%/\sqrt{12}} = 23.64$$

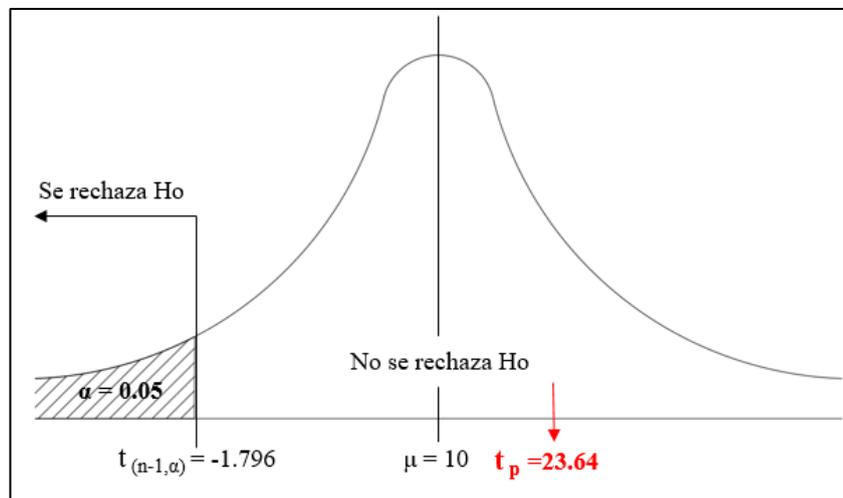


Figura N° 50: Contrastación de la hipótesis específica N° 02, con macrofibras de polipropileno

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura N° 50, $t_p > t_{(n-1, \alpha)}$; por lo tanto no se rechaza H_0 , y se concluye, con un nivel de significancia del 5% que los datos no revelan evidencia suficiente para rechazar que el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto con macrofibras de polipropileno es mayor

al 10%, tal como se comprueba en los resultados de esta investigación, donde se obtiene un incremento porcentual máximo de la resistencia a flexión del concreto de hasta el 18%.

Microfibras de polipropileno:

Para esta prueba se consideró los resultados de los ensayos en donde se obtuvo el máximo incremento de resistencia a flexión del concreto, y que corresponde a dosificaciones de microfibras de polipropileno en el rango de 0.45 Kg/m³ a 0.90 Kg/m³. Tomando este rango, en la Tabla N° 36 se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla N° 36: Valores del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno

Dosificación de microfibras de polipropileno (Kg/m³)	Δ% MR
0.50	18.01%
0.50	9.52%
0.60	7.16%
0.60	9.03%
0.60	18.53%
0.60	14.00%
0.60	5.12%
0.60	5.39%
0.60	4.94%
0.70	25.67%
0.70	19.67%
0.80	11.31%
0.90	14.85%

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados del incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno ($\Delta\%MR$), se obtuvo:

- Número de datos: $n = 13$
- Media de la muestra: $\bar{X} = 12.55\%$
- Desviación estándar de la muestra: $s = 6.53\%$

Para la contrastación de hipótesis se ha planteado lo siguiente:

- Hipótesis nula: $H_0: \mu \geq 10\%$

“La resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno incrementa más del 10%”.

- Hipótesis alterna: $H_1: \mu < 10\%$

“La resistencia a flexión del concreto reforzado con microfibras de polipropileno incrementa hasta un 10%”.

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

- Grados de libertad: $gl = n-1 = 12$

Se determinó el valor del punto crítico mediante el uso de la Tabla N° 37:

- Punto crítico: $t(n-1, \alpha) = -1.782$ (cola hacia la izquierda)

Tabla N° 37: Valor crítico de la distribución t de Student para la hipótesis específica N° 02

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN t DE STUDENT							
	α	0.01	0.015	0.02	0.025	0.05	0.1
Grados de libertad	1	31.821	21.205	15.895	12.706	6.314	3.078
	2	6.965	5.643	4.849	4.303	2.920	1.886
	3	4.541	3.896	3.482	3.182	2.353	1.638
	4	3.747	3.298	2.999	2.776	2.132	1.533
	5	3.365	3.003	2.757	2.571	2.015	1.476
	6	3.143	2.829	2.612	2.447	1.943	1.440
	7	2.998	2.715	2.517	2.365	1.895	1.415
	8	2.896	2.634	2.449	2.306	1.860	1.397
	9	2.821	2.574	2.398	2.262	1.833	1.383
	10	2.764	2.527	2.359	2.228	1.812	1.372
	11	2.718	2.491	2.328	2.201	1.796	1.363
	12	2.681	2.461	2.303	2.179	1.782	1.356

Fuente: Elaboración propia

Se utilizó la prueba estadística t de Student debido a que la muestra $n < 30$, y la varianza poblacional es desconocida:

$$t_p = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}} = \frac{12.55\% - 10\%}{6.53\%/\sqrt{13}} = 1.41$$

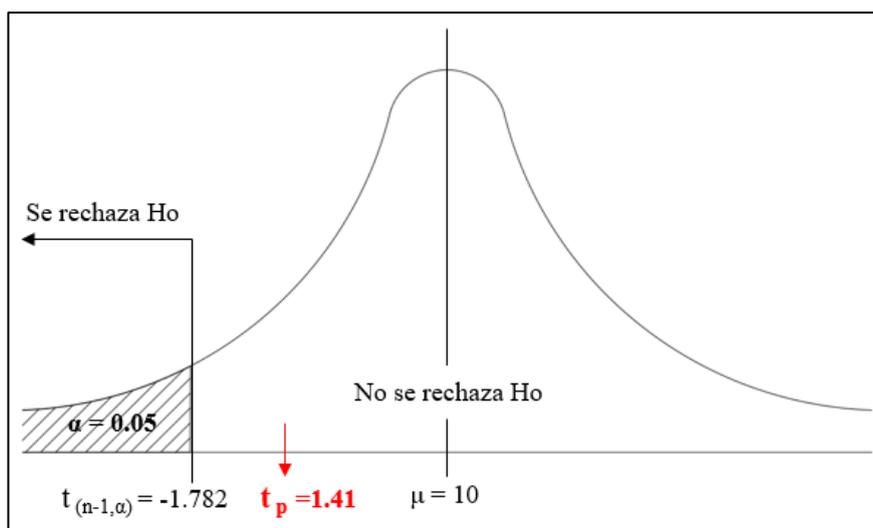


Figura N° 51: Contrastación de la hipótesis específica N° 02, con microfibras de polipropileno
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Figura N° 51, $t_p > t_{(n-1,\alpha)}$; por lo tanto no se rechaza H_0 , y se concluye, con un nivel de significancia del 5% que los datos no revelan evidencia suficiente para rechazar que el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto con microfibras de polipropileno es mayor al 10%, tal como se comprueba en los resultados de esta investigación, donde se obtiene un incremento porcentual máximo de la resistencia a flexión del concreto de hasta el 12%.

7.3.3. Contrastación de hipótesis general

Hipótesis general: “La adición de fibras de acero o fibras de polipropileno incrementa la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos, hasta un 30 % y 10% respectivamente”.

Los resultados obtenidos en las hipótesis específicas N° 01 y N° 02, rechazan la hipótesis general, ya que la resistencia a flexión del concreto con fibras puede llegar a incrementarse hasta el 37% en el caso de fibras de acero, hasta el 18% en el caso de macrofibras de polipropileno y hasta el 12% en el caso de microfibras de polipropileno.

CONCLUSIONES

1. El máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico reforzado con fibras de acero es del 37 % para una dosificación óptima de fibras de acero de 37 Kg/m³.
2. El máximo incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico reforzado con macrofibras de polipropileno es del 18 % para una dosificación óptima de macrofibras de 5 Kg/m³; y para el caso de microfibras de polipropileno, el incremento es del 12 % para una dosificación óptima de microfibras de 0.45 Kg/m³.
3. Las dosificaciones mayores a 47 Kg/m³ de fibra de acero, 7.80 Kg/m³ de macrofibras de polipropileno y 0.90 Kg/m³ de microfibras de polipropileno, traen una reducción en el incremento porcentual de la resistencia a la flexión del concreto hidráulico, la que puede ser explicada por la pérdida de trabajabilidad de la mezcla, así como por la formación de erizos o aglomeraciones de fibra que forman poros en la matriz del concreto.
4. Las fibras de acero han demostrado ser las más efectivas en el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico para pavimentos rígidos.
5. Los pavimentos de concreto hidráulico reforzado con fibras de acero pueden ser hasta 18% más económicos que los pavimentos reforzados con malla de acero; y los pavimentos hidráulicos reforzados con fibras de polipropileno, son hasta 25% más económicos que los pavimentos reforzados con malla de acero.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ampliar esta investigación, estudiando la influencia de otras características de la fibra en el incremento porcentual de la resistencia a flexión del concreto hidráulico, tales como la esbeltez de la fibra, longitud de la fibra, forma de la fibra, entre otros.
2. Se recomienda en futuras investigaciones, proponer normas nacionales del uso de fibras para la fabricación de concreto hidráulico para pavimentos, con la finalidad de incrementar su resistencia a flexión y capacidad para el control de fisuras y grietas.
3. Considerar realizar monitoreos periódicos a los pavimentos hidráulicos fibroreforzados, de tal manera que se pueda observar el comportamiento de las fibras en el concreto, a través de medición de deflexiones en las losas, obtención de diamantinas o mediciones de serviciabilidad del pavimento rígido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, O. (2017). *Resistencia Mecánica del Concreto $f_c=210$ kg/cm² con la Adición de Fibras de Acero Dramix y Sika*. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/13479>
- ACI Committee 544. (2002). *ACI 544.1R-96: Report on Fiber Reinforced Concrete*. Obtenido de <http://indiafiber.com/Files/ACI%20report.pdf>
- Acuña, J., & Acuña, B. (2019). *Evaluación, Comparación y Diseño de Pavimento Rígido Convencional y con la Adición de Fibra de Acero mediante la Guía de la AASHTO 93 y la Guía de la Portland Cement Association (PCA) aplicado a la Av. La Florida y Pasajes Aledaños, Cusco*. Obtenido de <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9090>
- Aguilar, A., & Gonzales, R. (2017). *Análisis y Evaluación del Comportamiento a la Fatiga de un Pavimento Rígido con Fibra Plástica de Polipropileno en el Altiplano*. Obtenido de <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/1469>
- Aire, C., Aguado, A., & Molins, C. (2013). *Método de Doble Punzonamiento de Tracción Indirecta para Concreto Reforzado con Fibra: Ensayo Barcelona*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Aire/publication/271827615_Metodo_de_doble_punzonamiento_de_traccion_indirecta_para_concreto_reforzado_con_fibra_Ensayo_Barcelona_Double_punch_test_to_evaluate_indirect_tensile_strength_of_fiber_reinforced_concr
- Amaya, S., & Ramírez, M. (2019). *Evaluación del Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado con Fibras*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23923/1/PROYECTO%20DE%20GRADO%20ENTREGA%20FINAL.pdf>
- Armas, C. (2016). *Efectos de la Adición de Fibra de Polipropileno en las Propiedades Plásticas y Mecánicas del Concreto Hidráulico*. Obtenido de <http://repositorio.uss.edu.pe/handle/uss/2712>
- Aureliano, I. J. (2018). *Influencia de Acero Trefilado y Plastificante en el Mejoramiento de Flexión y Compresión del Concreto usado para Pavimentos Rígidos, Trujillo, 2018*. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/14114>

- Badell, R. (18 de mayo de 2016). *Bekaert: Pavimentos Armados con Fibras Metálicas*. Obtenido de <https://docplayer.es/106012020-Pavimentos-armados-con-fibras-metalicas.html>
- Baldeon, J. (2017). *Mejoramiento Funcional en las Propiedades del Concreto Hidráulico incorporando Fibras de Polipropileno al Pavimento Rígido, Comas-El correo, 2017*. Obtenido de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/25346/Baldeon_AJF.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Barman, M., & Hansen, B. (agosto de 2018). *Comparison of Performances of Structural Fibers and Development of a Specification for Using Them in Thin Concrete Overlays*. Obtenido de <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/202064>
- Becerra, M. (2012). *Tópicos de Pavimentos de Concreto: Diseño, Construcción y Supervisión*. Lima, Perú: Flujo Libre. Obtenido de https://www.academia.edu/9036949/Autor_T%C3%B3picos_de_Pavimentos_de_Concreto
- Bekaert. (marzo de 2007). Reportajes técnicos Publicitarios: Fibras de acero Dramix. *Revista técnica de Construcción y Tecnología- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)*, 26-27. Obtenido de <http://www.imcyc.com/revistact06/mar07/BEKAERT.pdf>
- Blanco, A. (2008). *Durabilidad del Hormigón con Fibras de Acero*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6557>
- Caballero, K. (julio de 2017). Propiedades Mecánicas del Concreto Reforzado con Fibras Metálicas. *Revista Prisma Tecnológico*, 8(1), 18-23. Obtenido de <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/1527/pdf>
- Cañette, P., Eguren, M., & García, M. (2017). *Diseño y Control del Hormigón Reforzado con Fibras en Uruguay*. Obtenido de <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/24268/1/CEG17.pdf>
- CAPECO. (2018). Nueva Obra Vial en Piura: 3.5 Km de la Avenida Sánchez Cerro a través de Obras por Impuesto. *Construcción e Industria*, 38-41. Obtenido de <https://issuu.com/capeco.org/docs/rcei0918>

- Carrillo, J., & Rojas, J. (2017). *Análisis Comparativo de las Propiedades Mecánicas de Compresión y Flexión de un Concreto Patrón f_c 210 Kg/cm² y un Concreto reemplazado en Porcentajes del 1, 2, 3 Y 4% con Dramix 3d respecto al Volumen del Agregado Fino de la Mezcla*. Obtenido de <http://repositorio.uandina.edu.pe/handle/UAC/719>
- Champi, C., & Espinoza, L. (2017). *Análisis Comparativo de las Características Mecánicas a Compresión, Flexión y Costos de Materiales de un Concreto Patrón y otro Adicionado con Fibra Sintética Mejorada SIKAFIBER PE, elaborado con Agregado de las Canteras Cunyac y Vicho*. Obtenido de <http://190.119.204.72/handle/UAC/1303>
- Chancha, C., & Paredes, N. (2013). *Pavimento de Concreto Reforzado con Fibras Metálicas, en los Barrios de Bellavista y Pueblo Nuevo del Distrito de Lircay en el año 2012*. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/234/TP%20-%20UNH%20CIVIL%200018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chapoñan, J., & Quispe, J. (2017). *Análisis del Comportamiento en las Propiedades del Concreto Hidráulico para el Diseño de Pavimentos Rígidos adicionando Fibras de Polipropileno en el A.A.H.H Villa María-Nuevo Chimbote*. Obtenido de <http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2724/42998.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chilón, S. (2018). *Influencia de la Fibra Sintética (Sika® Fiber Force PP-48) en el Comportamiento Mecánico de un Concreto Autocompactante con $f_c=280$ kg/cm²*. Obtenido de <http://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1835/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Collazos, J. (15 de junio de 2012). *4to Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Concreto: "Utilización de Fibras de Acero como refuerzo en Pavimentos de Concreto"*. Obtenido de studylib: <https://studylib.es/doc/7595476/fibras-metalicas-en-pavimentos-de-concreto>
- Condori, J. (2016). *Análisis de la Incidencia de las Fibras de Acero Dramix en el Comportamiento Elástico del Concreto empleando el Cemento Portland Tipo IP*. Obtenido de <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/729>

- Corcino, V. (2007). *Estudio Comparativo de Concreto Simple Reforzado con Fibras de Acero Dramix y Wirand, empleando Cemento Andino Tipo V*. Obtenido de http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/urp/125/corcino_vc.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Córdova, C., Cuéllar, L., & Guizado, M. (2012). *Comparación de la Resistencia Equivalente a la Flexión entre las Fibras de Acero Wirand producidas en Italia y las producidas en Perú*. Obtenido de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/1612/CORDOVA_CLAUDIA_Y_CUELLAR_LISETH_Y_GUIZADO_MAYRA_FLEXION_FIBRAS_ACERO_WIRAND.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cusquisiván, M., & Sáenz, J. (2016). *Comparación de la Resistencia a la Flexión que alcanza el Concreto Reforzado con Fibras de Acero con respecto al Concreto Tradicional para Pavimentos Rígidos, 2016*. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/7332/Cusquisiv%c3%a1n%20Chil%c3%b3n%20Manuel%20Edgar%20%20S%c3%a1enz%20Correa%20Jean%20Pier%20%28Tesis%20Parcial%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- De la Cruz, W., & Quispe, W. (2014). *Influencia de la Adición de Fibras de Acero en el Concreto empleado para Pavimentos en la Construcción de Pistas en la Provincia de Huamanga - Ayacucho*. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/239/TP%20-%20UNH%20CIVIL%200023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones. (2017). *Dirección Regional de Transportes y Comunicaciones inauguró Obra del Mejoramiento Vial del Jirón Gonzales Prada*. Obtenido de <http://www.drtcmadrededios.gob.pe/index.php/root/generar-automaticamente-desde-el-titulo/generar-automaticamente-desde-el-titulo/8-principal/noticias-y-actualidad/75-direccion-regional-de-transportes-y-comunicaciones-inauguro-obra-del-mejoramiento-vial-de>
- Flores, E. (2018). *Mejoramiento de la Resistencia del Concreto Adicionando Fibras de Acero en la Av. Túpac Amaru, Distrito de Independencia, Lima - 2018*. Obtenido de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/29352/Flores_UEO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Flores, F., & Mamani, R. (2018). *Evaluación Comparativa de la Resistencia a Compresión y Flexión del Concreto Normal, con Fibra Sika Fiber CHO 65-35-NB y con Fibra Sika Fiber Force PP-48*. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7222>
- García, C. (29 de febrero de 2012). *¿Resistencia a la flexión del concreto?* Obtenido de https://www.academia.edu/37089056/Resistencia_a_la_flexi%C3%B3n_del_concreto
- Guevara, J. (2008). *Análisis Comparativo del Comportamiento del Concreto Simple con el Concreto Reforzado con Fibras de Acero Wirand*. Obtenido de http://168.121.49.87/bitstream/handle/urp/158/guevara_jr.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- INDECOPI. (31 de octubre de 2012). *NTP 339.078, CONCRETO: Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Flexión del Concreto en Vigas Simplemente Apoyadas con Cargas a los Tercios del Tramo*. Obtenido de KUPDF: https://kupdf.net/download/ntp-339078-ensayo-de-flexionpdf_5bc7cd13e2b6f5c848d97b35_pdf
- INDECOPI. (2014). *NTP 400.037: AGREGADOS - Especificaciones normalizadas para agregados en concreto*. Obtenido de KUPDF: https://kupdf.net/download/ntp-4000372014-agregados-especificaciones-para-agregados-en-concretopdf_5a4233e7e2b6f52b4b9a7232_pdf
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (23 de junio de 2015). *Seminario Tecnológico de Pavimento y Pisos de Hormigón: Cómo hacer Pisos Industriales de Hormigón con Fibras de Acero*. Obtenido de Slideshare: https://es.slideshare.net/Presentaciones_ICH/2015-06-23sempavconce3comohacerpisosindustrialesdehormigonconfibrasdeacero
- Isidro, G. (2017). *Influencia de las Fibras de Polipropileno en las Propiedades del Concreto $f'c$ 210 kg/cm²*. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3842>
- Isidro, J. (2018). *Influencia de la Adición de Fibras de Acero en las Propiedades del Concreto empleado para Pavimentos en la Construcción de Pistas en la Ciudad de Puno - Puno*. Obtenido de <http://tesis.unap.edu.pe/handle/UNAP/9626>

- Jovells, F. (2016). *Estudio Técnico Experimental de Hormigones con Fibras de Polipropileno, Fibras Metálicas y Áridos Reciclados para su Utilización en Pavimentos de Baja Intensidad de Tráfico*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/74485/DIEGO%20-%20Estudio%20t%20c3%a9cnico%20experimental%20de%20hormigones%20con%20fibras%20de%20polipropileno%20c%20fibras%20met%20c3%a1licas%20....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association. Obtenido de https://www.academia.edu/29059360/PCA_Dise%C3%B1o_y_Control_de_Mezclas_de_Concreto
- Lao, W. (2007). *Utilización de Fibras Metálicas para la Construcción de Concreto Reforzado en la Ciudad de Pucallpa*. Obtenido de http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/urp/145/lao_wj.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lima, D. (2017). *Aplicación de la Fibra de Polipropileno para mejorar las Propiedades Mecánicas del Concreto $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ Distrito Carabayllo, Lima - 2017*. Obtenido de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/23114/Lima_CDQ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lindao, K., & Romero, A. (2018). *Incidencia de las Fibras de Polipropileno y Fibras Metálicas en un Hormigón para Pavimento Rígido $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$* . Obtenido de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/38279/1/BMAT-V097-2018-Ing.%20CIVIL%20-%20LINDAO%20CEDE%20c3%91O%20KENIA%20PATRICIA%20-%20ROMERO%20ORTEGA%20ANA%20CRISTINA.pdf>
- MACCAFERRI. (06 de diciembre de 2011). *Casos de Obras: Almacén Cormin, Lima, Perú*. Obtenido de <http://www.saima.com.uy/casos-y-obras/78-almac%C3%A9n-cormin-per%C3%BA,-lima.html>
- MACCAFERRI. (2015). *PAVE 2008 rev. 1.3.0. Programa para la Verificación del Cálculo de Pisos y Pavimentos en Hormigón Fibroreforzado*. Obtenido de <https://docplayer.es/7653179-Programa-para-la-verificacion-del-calculo-de-pisos-y.html>

- MACCAFERRI. (2017). *Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón: Manual Técnico*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/33788897/fibras-como-elemento-estructural-para-el-refuerzo-del-hormigan>
- Mármol, P. (2010). *Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas*. Obtenido de http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf
- Meza, A. (2015). *Optimización del Concreto Reforzado con Fibras de Acero y Polipropileno en Pisos Industriales, basado en Análisis Experimental y Numérico*. Obtenido de <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/445/406756.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Miranda, C., & Rado, M. (2019). *Propuesta de Concretos Reforzados con Fibras de Acero y Cemento Puzolánico para la Construcción de Pavimentos Rígidos en la Región de Apurímac*. Obtenido de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628106/Rado_MM.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Montalvo, E. (2015). *Pavimentos Rígidos Reforzados con Fibras de acero versus Pavimentos Tradicionales*. Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6117>
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (2da ed.). Bogotá D.C., Colombia: Universidad Católica de Colombia. Obtenido de https://www.academia.edu/22782711/Ingenieria_de_pavimentos_Alfonso_Montejo_Fonseca
- Montoya, K. (2016). *Comparación de Resistencia a la Flexión, entre Concreto Fibroreforzado con Polipropileno y Concreto Reforzado con Fibras Metálicas, para uso en Carpetas de Rodadura en Parquesos*. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4653/1/Kevin%20Estuardo%20Montoya%20Valdez.pdf>
- National Ready Mixed Concrete Association. (s.f.). *Serie de Información Técnica "Concrete in Practice", CIP 16: Resistencia a Flexión del Concreto*. Obtenido de <https://concretesupplyco.com/wp-content/uploads/2017/01/16pes.pdf>

- Nuñez, L., & Mamani, F. (2018). *Influencia del Polipropileno y los Aditivos Incorporadores de Aire sometido al Congelamiento en las Propiedades del Concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, en la Zona Altiplánica 2017*. Obtenido de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8953>
- Ocampo, A. (2018). *Fibras de Acero Dramix: La Evolución del Acero*. Obtenido de Revista Fierros: <https://fierros.com.co/blog/proalco/fibras-acero-dramix-la-evolucion-del-acero/#:~:text=En%20Colombia%20el%20uso%20de,e1%20pa%C3%ADs%20evidencia%20esta%20tendencia.>
- Patazca, P., & Tafur, J. (2013). *Evaluación Comparativa de la Resistencia a Compresión y a Flexión del Concreto Convencional, Concreto con Fibra de Acero SikaFiber CHO 80/60 NB, y Concreto con Fibra Sintética SikaFiber Force PP/PE-700/55*. Obtenido de <http://repositorio.uss.edu.pe/handle/uss/1133?show=full>
- Pérez, J. (2015). *Patología de Estructuras de Hormigón Armado*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/DannyloAguilarPerez/trasparencias-patologia>
- Prodac Institucional. (12 de Junio de 2014). *Entrevista sobre uso de Fibra Dramix en el Patio Norte Sinchi Roca*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=HqjVe33p5as&t=96s>
- Ramirez, F., & Samaniego, J. (2016). *Estudio Comparativo de los Efectos sobre la Resistencia a la Flexión del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) usando Macro Fibras de Acero Dramix RC-65-35-BN y de Polipropileno/Polietileno TUF-STRAND SF*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15636>
- Ramos, N. (2019). *Análisis Comparativo del Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado con Fibra de Polipropileno y Acero*. Obtenido de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/2875>
- Rodríguez, C. (2016). *Análisis Comparativo de un Hormigón para la Capa de Rodadura con Fibras de Acero y sin ellas para Utilización en Pavimentos Rígidos*. Obtenido de http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/15427/1/RODRIGUEZ_CRISTHIA_N_TRABAJO_TITULACI%c3%92N_V%c3%8cAS_NOVIEMBRE_2016.pdf

- Rodríguez, J., & Segura, E. (2013). *Análisis Comparativo del Efecto de los Distintos tipos de Fibras en el Comportamiento Post Fisura del Hormigón Reforzado con Fibras*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33350/Proyecto%20Final%20de%20Grado.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Saludes, S., Aguado, A., & Molins, C. (2006). *Ensayo de Doble Punzonamiento Aplicado al Hormigón Reforzado con Fibras (Ensayo Barcelona)*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3323>
- Sánchez, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero* (5ta ed.). Santafé de Bogotá, D.C., Colombia: Bhandar Editores. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=EWq-QPJhsRAC&pg=PA15&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false
- Sarta, H., & Silva, J. (2017). *Análisis Comparativo entre el Concreto Simple y el Concreto con Adición de Fibra de Acero al 4% y 6%*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14513/1/AN%c3%81LISIS%20COMPARATIVO%20ENTRE%20EL%20CONCRETO%20SIMPLE%20Y%20EL%20CONCRETO%20CON%20ADICION%20DE%20FIBRA%20DE%20ACERO%20AL%204%25%20Y.pdf>
- SENCICO. (Marzo de 2010). *Norma CE.010 Pavimentos Urbanos*. Obtenido de slideshare: <https://es.slideshare.net/AdrianCiezaArias/ce010-p-urbanos>
- Sika Perú. (Agosto de 2011). *Sika Informaciones Técnicas: Concreto reforzado con fibras*. Obtenido de issuu: https://issuu.com/sikaperu/docs/concreto_reforzado_con_fibras_broch
- Silupu, H., & Saldaña, J. (2019). *Efectos de las Fibras de Polipropileno sobre las Propiedades Físico Mecánico de un Concreto Convencional para Pavimentos Rígidos utilizando Cemento Qhuna, Trujillo - La Libertad 2018*. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/15007?locale-attribute=en>
- Sotil, A., & Zegarra, J. (2015). *Análisis Comparativo del Comportamiento del Concreto sin Refuerzo, Concreto Reforzado con Fibras de Acero Wirand®FF3 y Concreto Reforzado con Fibras de Acero Wirand®FF4 aplicado a Losas Industriales de Pavimento Rígido*. Obtenido de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/581616>

- Uribe, W. (2017). *Influencia de las Fibras de Acero Wirand®FF1, en las Características Físicas y Mecánicas del Concreto f_c 28 Mpa, en el Distrito de Lima, 2017*. Obtenido de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/23129>
- Valera, E. (2017). *Incorporación de Fibras de Polipropileno (SikaFiber Force PP48) para Mejorar las Propiedades Plásticas y Mecánicas en un Concreto con Resistencia a la Compresión 28Mpa para el Departamento de Lima*. Obtenido de http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/22053/Valera_PEA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Valero, J. (2015). *Influencia de las Fibras de Polipropileno en la Fisuración Asociadas a la Retracción Plástica en Pavimentos de Concreto, Huancayo 2014*. Obtenido de http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/399/TCIV_09.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Vidaud, I., Frómeta, Z., & Vidaud, E. (2015). Una aproximación a los concretos reforzados con fibras (Parte I). *Revista técnica de Construcción y Tecnología (IMCYC)*. Obtenido de Revista técnica de Construcción y Tecnología (IMCYC): <https://docplayer.es/45319714-Una-aproximacion-a-los-concretos-reforzados-con-fibras.html>
- Vidaud, I., Frómeta, Z., & Vidaud, E. (2015). Una aproximación a los concretos reforzados con fibras (Parte II). *Revista técnica de Construcción y Tecnología (IMCYC)*, 34-37. Obtenido de <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/agosto2015/tecnologia.pdf>
- Zigurat Global Intitue of Technology. (23 de abril de 2013). *Seminario Internacional HRF: Aplicaciones relevantes a nivel Español*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=2djPw9bFVx8>

ANEXOS

Anexo N° 01: Matriz de consistencia

Problema Principal		Problemas Específicos		
¿Cómo influye la adición de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos?		¿Cuál es el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de fibra?	¿Cuál es el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de fibra?	
Objetivo Principal		Objetivos Específicos		
Analizar la influencia de la adición de fibras de acero y polipropileno en la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos, en base a los resultados de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, para disponer de información organizada y comparativa del uso de fibras.		Analizar el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de la fibra.	Analizar el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno usado en pavimentos rígidos, en función a la dosificación de la fibra.	
Hipótesis Principal		Hipótesis Específicas		
La adición de fibras de acero o fibras de polipropileno incrementa la resistencia a flexión del concreto usado en pavimentos rígidos, hasta un 30% y 10% respectivamente.		La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de acero incrementa hasta un 30%.	La resistencia a flexión del concreto reforzado con fibras de polipropileno incrementa hasta un 10%.	
Variables Independientes	Descripción de la Variable	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
X1: Fibras de acero	Secciones de metal que poseen una relación de aspecto (l/d) que va de 20 a 100 (Flores & Mamani, 2018).	Dosificaciones de fibras de acero	kg/m ³	Investigaciones nacionales e internacionales
X2: Fibras de polipropileno	Secciones producidas por polímero de hidrocarburo sintético, hechas usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel (Valero, 2015).	Dosificaciones de fibras de polipropileno	kg/m ³	Investigaciones nacionales e internacionales
Variables Dependientes	Descripción De La Variable	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
Y1: Resistencia a flexión del concreto	Medida de la resistencia a la tracción del concreto. Medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada (Champi & Espinoza, 2017).	Incremento de la resistencia a flexión del concreto	%	Investigaciones nacionales e internacionales

Fuente: Elaboración propia

Anexo N° 02: Características de las fibras utilizadas en los ensayos

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Carrillo & Rojas (2017)	Cusco, Perú	FRC1	Acero	Dramix 3D 45/50 BL	50.00	1.05	45	1115	210000
Córdova, Cuéllar, & Guizado (2012)	Lima, Perú	FRC2	Acero	Wirand FF1	50.00	1.00	50	1100	210000
		FRC3	Acero	Wirand FF3	50.00	0.75	67	1200	210000
Flores (2018)	Lima, Perú	FRC4	Acero	Wirand FF1	50.00	1.00	50	1100	210000
Sotil & Zegarra (2015)	Lima, Perú	FRC5	Acero	Wirand FF3	50.00	0.75	67	1200	210000
		FRC6	Acero	Wirand FF4	60.00	0.75	80	1200	210000
Uribe (2017)	Lima, Perú	FRC7	Acero	Wirand FF1	50.00	1.00	50	1100	210000
Isidro (2018)	Puno, Perú	FRC8	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000
Flores & Mamani (2018)	Puno, Perú	FRC9	Acero	SikaFiber CHO 65/35 NB	35.00	0.54	65	1300	210000
		FRC10	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP48	48.00	0.33 x 1.29	145	620	5000 a 25000
Lao (2007)	Pucallpa, Perú	FRC11	Acero	Wirand FF1	50.00	1.00	50	1100	210000

Fuente: Elaboración propia

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Chapoñan & Quispe (2017)	Nuevo Chimbote, Perú	FRC12	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
Chilón (2018)	Cajamarca, Perú	FRC13	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP48	48.00	0.33 x 1.29	145	620	5000 a 25000
Ramos (2019)	Cajamarca, Perú	FRC14	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
		FRC15	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000
Silupu & Saldaña (2019)	Trujillo, Perú	FRC16	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
		FRC17	Microfibras de Polipropileno	Z-Aditivos	50.00	-	-	560	1500
Armas (2016)	Lambayeque, Perú	FRC18	Microfibras de Polipropileno	Chema fibra ultrafina	19.00	-	-	480	4480
De la Cruz & Quispe (2014)	Ayacucho, Perú	FRC19	Acero	Wirand FF1	50.00	1.00	50	1100	210000
Miranda y Rado (2019)	Apurímac, Perú	FRC20	Acero	No indica	-	-	-	-	-
Abanto (2017)	Cajamarca, Perú	FRC21	Acero	Dramix 3D 80/60 BG	60.00	0.75	80	1225	210000
		FRC22	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000

Fuente: Elaboración propia

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Cusquisiván & Sáenz (2016)	Cajamarca, Perú	FRC23	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000
		FRC24	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000
Acuña & Acuña (2019)	Cusco, Perú	FRC25	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000
Chancha & Paredes (2013)	Huancavelica, Perú	FRC26	Acero	Dramix RC 65/35 BN	35.00	0.55	65	1100	210000
Baldeon (2017)	Lima, Perú	FRC27	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
Lima (2017)	Lima, Perú	FRC28	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
Valera (2017)	Lima, Perú	FRC29	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP48	48.00	0.33 x 1.29	145	550	5000 a 25000
Aguilar & Gonzales (2017)	Puno, Perú	FRC30	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500

Fuente: Elaboración propia

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Aire, Aguado, & Molins (2013)	México	FRC31	Acero	Dramix RC 65/35 BN	35.00	0.55	65	1345	210000
		FRC32	Acero	Dramix RC 65/40 CN	40.00	0.62	65	1440	210000
		FRC33	Acero	Wirand FF3	50.00	0.75	67	1230	210000
		FRC34	Acero	Dramix RC 65/60 BN	60.00	0.90	67	1160	210000
Sarta & Silva (2017)	Bogotá, Colombia	FRC35	Acero	Dramix 3D RC 65/35 BG	35.00	0.55	65	1345	210000
Rodríguez & Segura (2013)	Valencia, España	FRC36	Acero	Dramix RC-65/35-BN	35.00	0.55	65	1345	210000
		FRC37	Acero	Dramix RC-80/35-BN	35.00	0.45	80	1050	210000
		FRC38	Macrofibras de Polipropileno	Enduro 600	50.00	0.70	71	412	6000
		FRC39	Macrofibras de Polipropileno	Sika Fiber M48	48.00	0.90	65	400	6000
Rodríguez (2016)	Guayaquil, Ecuador	FRC40	Acero	Dramix RC 80/60-BN	60.00	0.75	80	1225	210000
Ramírez & Samaniego (2016)	Quito, Ecuador	FRC41	Acero	Dramix RC-65/35-BN	35.00	0.55	65	1345	210000
		FRC42	Macrofibras de Polipropileno	TUF-STRAND SF	51.00	0.69	74	650	9500

Fuente: Elaboración propia

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Montoya (2016)	Guatemala	FRC43	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP/PE-700/55	55.00	-	-	360	-
		FRC44	Acero	SikaFiber CHO 65/35 NB	35.00	0.54	65	1300	210000
Meza (2015)	Aguascalientes, México	FRC45	Acero	Dramix	60.00	0.90	67	1160	210000
		FRC46	Acero	Ramgra con Estribos	40.00	1.00	40	1072	210000
		FRC47	Acero	Ramgra Ondulada	29.00	1.00	29	1072	210000
		FRC48	Acero	Fibracero	25.00	0.50	24	1100	210000
		FRC49	Acero	Tecnor	39.00	2.00 x 1.00	50	1765	210000
		FRC50	Macrofibras de Polipropileno	Macmatrix	50.00	1.50 x 0.50	61	586	4000
		FRC51	Microfibras de Polipropileno	MasterFiber micro	19.00	-	-	552	3794
Lindao & Romero (2018)	Guayaquil, Ecuador	FRC52	Acero	Dramix 3D 80/60 BG	60.00	0.75	80	1225	210000
		FRC53	Macrofibras de Polipropileno	EPS Fibratex	-	-	-	-	-
Isidro (2017)	Puno, Perú	FRC54	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500

Fuente: Elaboración propia

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Núñez & Mamani (2018)	Puno, Perú	FRC55	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
Amaya & Ramírez (2019)	Bogotá, Colombia	FRC56	Acero	Dramix 4D 55/60 BG	60.00	1.05	55	1500	210000
Patazca & Tafur (2013)	Chiclayo, Perú	FRC57	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000
		FRC58	Macrofibras de Polipropileno	SikaFiber Force PP/PE-700/55	55.00	-	-	360	-
Corcino (2007)	Lima, Perú	FRC59	Acero	Dramix	60.00	0.90	67	1160	210000
		FRC60	Acero	Wirand	-	-	-	1100	210000-
Guevara (2008)	Lima, Perú	FRC61	Acero	Wirand FF1	50.00	1.00	50	1100	210000
Condori (2016)	Juliaca, Perú	FRC62	Acero	Dramix	60.00	0.90	67	1160	210000
		FRC63	Acero	Dramix	60.00	0.90	67	1160	210000
Champi & Espinoza (2017)	Cusco, Perú	FRC64	Microfibras de Polipropileno	Sika Fiber PE	20.00	-	-	460	1500
Cañette, Eguren, & García (2017)	Montevideo, Uruguay	FRC65	Macrofibras de Polipropileno	Macronita	50.00	0.60	83.00	420	5400

Fuente: Elaboración propia

Autor	Ubicación	N° Ensayo	Características de fibra						
			Tipo de fibra	Marca de fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez (L/D)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Módulo de Young (Mpa)
Jovells (2016)	Valencia, España	FRC66	Macrofibras de Polipropileno	BASF 248/249	48.00	0.84	57	400	4000
		FRC67	Acero	Dramix 3D 65/60	60.00	0.90	65	1160	210000
		FRC68	Acero	Dramix 3D 45/50	50.00	1.05	45	1115	210000
Blanco (2008)	Barcelona, España	FRC69	Acero	Dramix RC-65/35-BN	35.00	0.55	64	1100	210000
		FRC70	Acero	Dramic RC-80/60-BN	60.00	0.75	80	1050	210000
Saludes, Aguado, & Molins (2006)	Barcelona, España	FRC71	Acero	No indica	-	-	-	-	-
Aureliano (2018)	Trujillo, Perú	FRC72	Acero	SikaFiber CHO 80/60 NB	60.00	0.75	80	1200	210000

Fuente: Elaboración propia

Anexo N° 03: Resultados a los 28 días de los ensayos de resistencia a flexión del
concreto

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Carrillo & Rojas (2017)	FRC1	Acero	210	0.00	46.42
				7.10	47.36
				14.20	55.93
				21.30	56.67
				28.39	54.63
Córdova, Cuéllar, & Guizado (2012)	FRC2	Acero	210	20.00	42.08
				25.00	40.81
	FRC3	Acero	210	20.00	43.52
				25.00	38.24
Flores (2018)	FRC4	Acero	210	0.00	32.00
				47.64	44.13
Sotil & Zegarra (2015)	FRC5	Acero	280	0.00	37.19
				20.00	43.41
				25.00	47.59
	FRC6	Acero	280	0.00	37.19
				20.00	44.84
25.00	56.76				
Uribe (2017)	FRC7	Acero	280	0.00	47.50
				20.00	55.00
				25.00	60.00
				35.00	69.00
Isidro (2018)	FRC8	Acero	210	0.00	41.00
				10.00	44.75
				20.00	46.04
				30.00	53.41
				45.00	54.07
Flores & Mamani (2018)	FRC9	Acero	210	0.00	26.64
				20.00	28.21
				30.00	28.59
				40.00	29.76
				50.00	34.64
	FRC10	Macrofibras de Polipropileno	210	0.00	26.64
				2.00	27.20
				5.00	27.60
				7.00	30.88
9.00	32.85				

Fuente: Elaboración propia

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Lao (2007)	FRC11	Acero	210	25.00	28.66
Chapoñan & Quispe (2017)	FRC12	Microfibras de Polipropileno	280	0.00	44.84
				0.45	44.56
				0.60	48.05
				0.69	45.92
				0.75	43.73
Chilón (2018)	FRC13	Macrofibras de Polipropileno	280	0.00	56.59
				2.00	60.51
				3.00	53.32
				4.00	48.12
Ramos (2019)	FRC14	Microfibras de Polipropileno	250	0.00	44.39
				0.40	47.75
				0.60	48.40
				0.80	49.41
	FRC15	Acero	250	0.00	44.39
				15.00	50.48
				30.00	52.70
				45.00	54.62
Silupu & Saldaña (2019)	FRC16	Microfibras de Polipropileno	280	0.00	48.30
				0.30	50.20
				0.50	57.00
				0.70	60.70
	FRC17	Microfibras de Polipropileno	280	0.00	48.30
				0.30	50.10
				0.50	52.90
				0.70	57.80
Armas (2016)	FRC18	Microfibras de Polipropileno	210	0.00	41.66
				0.20	43.43
				0.30	45.90
				0.40	47.53
De la Cruz & Quispe (2014)	FRC19	Acero	210	0.00	34.00
				20.00	40.00
Miranda & Rado (2019)	FRC20	Acero	280	0.00	43.30
				20.00	47.60
				25.00	52.70
				30.00	58.00

Fuente: Elaboración propia

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Abanto (2017)	FRC21	Acero	210	0.00	34.39
				8.45	41.25
				12.68	46.20
	FRC22	Acero	210	0.00	34.39
				8.45	40.89
				12.68	44.67
Cusquisiván & Sáenz (2016)	FRC23	Acero	210	0.00	34.97
				19.20	37.78
				24.00	39.88
	FRC24	Acero	280	0.00	43.10
				19.20	46.47
				24.00	49.17
				28.80	39.05
Acuña & Acuña (2019)	FRC25	Acero	210	0.00	31.69
				15.00	35.67
				25.00	38.62
				35.00	42.59
				45.00	48.30
Chancha & Paredes (2013)	FRC26	Acero	210	0.00	40.00
				20.00	50.00
Baldeon (2017)	FRC27	Microfibras de Polipropileno	280	0.00	36.70
				0.60	43.50
Lima (2017)	FRC28	Microfibras de Polipropileno	280	0.00	31.97
				1.30	33.89
Valera (2017)	FRC29	Macrofibras de Polipropileno	280	0.00	70.85
				2.00	68.24
				3.00	75.83
				4.00	82.54
Aguilar & Gonzales (2017)	FRC30	Microfibras de Polipropileno	210	0.00	28.65
				0.50	27.96
				0.60	32.66
				0.70	27.97
Aire, Aguado, & Molins (2013)	FRC31	Acero 35mm	210	30.00	62.00
	FRC32	Acero 40mm	210	30.00	54.15
	FRC33	Acero 50mm	210	30.00	63.83
	FRC34	Acero 60mm	210	30.00	59.04

Fuente: Elaboración propia

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Sarta & Silva (2017)	FRC35	Acero	210	0.00	37.61
				29.00	54.53
				43.00	58.77
Rodríguez & Segura (2013)	FRC36	Acero	210	0.00	48.54
				20.00	44.05
				15.00	44.05
	FRC37	Acero	210	0.00	48.54
				20.00	42.42
				25.00	39.16
	FRC38	Macrofibras de Polipropileno	210	0.00	48.54
				5.00	52.20
				4.00	55.47
	FRC39	Macrofibras de Polipropileno	210	0.00	48.54
				4.00	52.20
				5.00	45.68
Rodríguez (2016)	FRC40	Acero	280	0.00	36.81
				20.00	45.17
Ramírez & Samaniego (2016)	FRC41	Acero	245	0.00	28.65
				15.00	35.18
				20.00	38.34
				25.00	36.00
	FRC42	Macrofibras de Polipropileno	245	0.00	28.65
				4.00	28.96
				6.00	28.96
				8.00	32.33
Montoya (2016)	FRC43	Macrofibras de Polipropileno	210	0.00	45.12
				2.00	46.63
				8.00	39.98
	FRC44	Acero	210	0.00	45.12
				30.00	51.17
				45.00	42.80

Fuente: Elaboración propia

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Meza (2015)	FRC45	Acero	210	0.00	44.48
				28.00	49.65
	FRC46	Acero	210	0.00	44.48
				28.00	49.52
	FRC47	Acero	210	0.00	44.48
				28.00	42.77
	FRC48	Acero	210	0.00	44.48
				27.00	45.77
	FRC49	Acero	210	0.00	44.48
				6.00	45.63
FRC50	Macrofibras de Polipropileno	210	0.00	44.48	
			3.00	44.31	
FRC51	Microfibras de Polipropileno	210	0.00	44.48	
			0.60	42.96	
Lindao & Romero (2018)	FRC52	Acero	350	0.00	42.67
				30.00	48.33
	FRC53	Macrofibras de Polipropileno	350	0.00	42.67
				1.73	44.00
Isidro (2017)	FRC54	Microfibras de Polipropileno	210	0.00	32.24
				0.60	33.89
				1.20	35.06
				1.80	37.64
				2.40	35.61
Nuñez & Mamani (2018)	FRC55	Microfibras de Polipropileno	21	0.00	31.56
				0.60	33.26
				1.20	35.35
				1.80	35.12
				2.40	34.55
Amaya & Ramírez (2019)	FRC56	Acero	245	0.00	41.32
				20.00	67.60
Patazca & Tafur (2013)	FRC57	Acero	210	10.00	40.00
				27.50	42.00
				45.00	43.00
	FRC58	Macrofibras de Polipropileno	210	2.00	39.00
				5.00	39.00
				8.00	41.00

Fuente: Elaboración propia

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Corcino (2007)	FRC59	Acero	280	0.00	54.90
				20.00	49.10
				25.00	55.80
				35.00	58.50
	FRC60	Acero	280	0.00	54.90
				20.00	54.90
				25.00	52.80
				35.00	54.90
Guevara (2008)	FRC61	Acero	280	0.00	48.00
				20.00	55.00
				25.00	60.00
				35.00	69.00
Condori (2016)	FRC62	Acero	175	0.00	25.59
				60.00	27.16
	FRC63	Acero	210	0.00	38.24
				60.00	40.18
Champi & Espinoza (2017)	FRC64	Microfibras de Polipropileno	210	0.00	34.41
				0.30	35.78
				0.60	36.11
				0.90	39.52
Cañette, Eguren, & García (2017)	FRC65	Macrofibras de Polipropileno	250	3.00	40.02
				4.60	51.19
Jovells (2016)	FRC66	Macrofibras de Polipropileno	210	5.00	44.87
				10.00	36.91
	FRC67	Acero	210	20.00	41.30
	FRC68	Acero	210	30.00	41.71
Blanco (2008)	FRC69	Acero	210	0.00	25.59
				20.00	39.16
				40.00	36.91
	FRC70	Acero	210	0.00	25.59
				20.00	34.16
				40.00	31.82

Fuente: Elaboración propia

Autor	N° Ensayo	Tipo de fibra	Resistencia de diseño f'c	Ensayo de Resistencia a Flexión	
				Dosificación de fibra	Módulo de Rotura promedio a los 28 días
			Kg/cm2	kg/m3	Kg/cm2
Saludes, Aguado, & Molins (2006)	FRC71	Acero	210	30.00	47.32
				33.00	49.66
				36.00	45.79
				40.00	50.88
				60.00	57.61
				30.00	47.21
				33.00	50.27
				36.00	50.48
				40.00	48.54
				60.00	59.35
Aureliano (2018)	FRC72	Acero	210	0.00	48.00
				20.00	57.00

Fuente: Elaboración propia