

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**Estudio de Factibilidad para la Implementación de la Tecnología de
Hormigones Reforzados con Fibra, en la Construcción de Pavimentos
Aeroportuarios en Chile**

Memoria de Titulación presentada por
DANIELA CAROLINA GÁLVEZ GODOY

Como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
Ph.D. GABRIEL GARCÍA SAÁ
Ph.D. ALELI OSORIO LIRD

Julio de 2021

TÍTULO DE LA TESIS

Estudio de Factibilidad para la Implementación de la Tecnología de Hormigones Reforzados con Fibra, en la Construcción de Pavimentos Aeroportuarios en Chile.

AUTOR

DANIELA CAROLINA GÁLVEZ GODOY

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Ph.D. GABRIEL GARCÍA SAÁ

Ph.D. ALELI OSORIO LIRD

Santiago, Chile, julio de 2021

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis padres por su cariño y apoyo incondicional en mis decisiones y por siempre esforzarse en entregarme una educación de calidad. También agradecer a mis amigos de universidad, quienes han sido parte de mi crecimiento personal y con quienes enfrentamos este proceso tan arduo para ser profesionales.

También agradecer a mis profesores, Gabriel García y Alelí Osorio, y a los trabajadores de la Dirección de Aeropuertos, por confiar en mí y dedicarme su tiempo y energía para sacar adelante este proceso.

RESUMEN

En Chile existen aproximadamente 2,6 millones de metros cuadrados de pavimentos aeroportuarios rígidos construidos a la fecha, en el área de movimiento de la Red Nacional de la Dirección de Aeropuertos, según el levantamiento de pavimentos realizado en el año 2019. La mayoría de estos pavimentos tienen grandes espesores de losa que varían entre 30 a 45 cm con el fin de soportar las grandes cargas de las aeronaves a las cuales están solicitados. Con el paso del tiempo, en el rubro de los pavimentos viales, se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten mejorar su calidad, otorgándole una mayor durabilidad, o, por el contrario, disminuir espesores de losa, manteniendo la durabilidad de un hormigón convencional. Es así como llega el hormigón reforzado con fibras (HRF) a revolucionar el área de vialidad de la ingeniería civil. El HRF corresponde al hormigón al cual se le han incorporado fibras en el proceso de mezcla, siendo las macrofibras de acero o sintéticas las principales utilizadas en aplicaciones de pavimentos. Las macrofibras han mostrado mejorar la capacidad última a flexión de las losas de hormigón, permitiendo un diseño estructural más eficiente del espesor de losa. Lo anterior mediante el uso de la resistencia residual a una deflexión de 3 mm (f_{150}) dada en la norma ASTM C1609, la cual ha mostrado cuantificar los beneficios de agregar cualquier tipo de macrofibra en la capacidad de la losa. Al agregar la resistencia residual (f_{150}) a la resistencia a flexión del hormigón (f_1), se obtiene una resistencia a flexión efectiva (f_{eff}) que puede ser usada en programas de diseño de pavimentos estructurales existentes. Algunos valores de resistencia residual para aplicaciones de pavimentos varían entre 0,7 a 1,5 MPa.

El objetivo de esta tesis que nace en el marco del Convenio de Colaboración entre la Universidad Técnica Federico Santa María y la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas es evaluar la factibilidad técnica – económica de implementar hormigón reforzado con fibras en aplicaciones de pavimentos aeroportuarios en Chile, ya sea en plataformas o en calles de rodaje de aeronaves. Para llevar a cabo lo anterior, se hace indispensable realizar un estudio bibliográfico para establecer el estado del arte y de la práctica, definiendo parámetros de diseño y especificaciones que permitan llevar cabo una correcta implementación de este tipo de tecnología en los pavimentos aeroportuarios, logrando así, un adecuado estudio de factibilidad económica que sea de utilidad para la Dirección de Aeropuertos.

ABSTRACT

In Chile there are approximately 2,6 million square meters of rigid airport pavements built to date, in the area of movement of the National Airport Management Network, according to the pavement survey carried out in 2019. Most of these pavements have wide slab thicknesses that vary between 30 to 45 cm in order to withstand the high loads of the aircraft to which they are requested. Over time, new technologies have been developed in this area, which allow improving the quality of the pavement, giving it greater durability, or, on the contrary, reducing slab thicknesses, maintaining the durability of conventional concrete. This is how fiber-reinforced concrete (FRC) came to revolutionize the area of civil engineering roads. HRF corresponds to concrete to which fibers have been incorporated in the mixing process, with steel or synthetic macrofibers being the main ones used in pavement applications. The macrofibers have been shown to improve the ultimate flexural capacity of concrete slabs, allowing a more efficient structural design of the slab thickness. The foregoing by using the residual resistance at a deflection of 3 mm (f_{150}) given in the ASTM C1609 standard, which has been shown to quantify the benefits of adding any type of macrofiber in the capacity of the slab. By adding the residual strength (f_{150}) to the concrete flexural strength (f_1), an effective flexural strength (f_{eff}) is obtained that can be used in existing structural pavement design programs. Some residual strength values for pavement applications range from 0,7 to 1,5 MPa.

The objective of this thesis that was born within the framework of the Collaboration Agreement between the Federico Santa María Technical University and the Airports Management of the Ministry of Public Works is to evaluate the technical-economic feasibility of implementing fiber-reinforced concrete in airport pavement applications in Chile, either on platforms or on aircraft taxiways. To carry out the above, it is essential to carry out a bibliographic study to establish the state of the art and practice, defining design parameters and specifications that allow the correct implementation of this type of technology in airport pavements, thus achieving, a suitable study of economic feasibility that is useful for the Airports Management.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
GLOSARIO.....	xiii
1 CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes Generales.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Principal	2
1.2.2 Secundarios.....	2
1.3 Alcances del Estudio.....	3
1.4 Metodología de Trabajo.....	3
1.5 Estructura de la Tesis	4
2 CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Características y Tipos de Fibras	5
2.1.1 Clasificación según Tamaño.....	6
2.1.2 Clasificación según Textura y Forma	9
2.1.3 Clasificación según Empaquetado.....	10
2.1.4 Clasificación según Tipo de Material Fibroso.....	11
2.2 Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras	15
2.2.1 Propiedades de Hormigón Reforzado con Fibra en Estado Fresco	15
2.2.2 Propiedades de Hormigón Reforzado con Fibra en Estado Endurecido	18
2.3 Cambios en la Mezcla y Constructibilidad del Hormigón Reforzado con Fibra ...	23
2.3.1 Preparación de la Superficie	23
2.3.2 Proporciones de Mezcla en Hormigón Reforzado con Fibra.....	24
2.3.3 Posicionamiento y Consolidación	25
2.3.4 Terminaciones	25
2.4 Métodos de Prueba para Hormigón Reforzado con Fibra	30
2.4.1 Pruebas en Estado Fresco	30
2.4.2 Pruebas en Estado Endurecido	30
2.5 Metodología de Diseño de Pavimentos y Recapados de HRF	40
2.6 Ensayos Realizados en Laboratorio y Escala Real	44
2.6.1 Ensayos en Laboratorio a Escala Reducida	44

2.6.2	Ensayos en Laboratorio a Gran Escala	51
2.6.3	Ensayos a Escala Real.....	55
2.7	Beneficios de Utilizar Fibra en el Hormigón	60
2.8	Aplicaciones de Hormigón Reforzado con Fibras	61
3	CAPÍTULO 3 FACTIBILIDAD TÉCNICA – ECONÓMICA.....	67
3.1	Antecedentes del Proyecto	67
3.2	Cotización de Fibras	68
3.3	Diseño Espesor Pavimento de Hormigón Reforzado con Fibras	70
3.4	Factibilidad Técnica – Económica del Uso de HRF	75
3.4.1	Presupuesto y Programación de Calle de Rodaje Kilo sin utilizar Fibra.....	76
3.4.2	Presupuesto y Programación de Calle de Rodaje Kilo utilizando HRF.....	79
3.4.3	Comparación de Presupuestos Conservación Calle Rodaje Kilo.	81
3.4.4	Comparación de Presupuestos Proyecto Completo.....	82
4	CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
4.1	Conclusiones	84
4.2	Recomendaciones.....	86
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
6	ANEXO A.....	93
7	ANEXO B.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Resumen conceptual de las distintas clasificaciones de fibras.....	6
Figura 2.2. Ejemplo de Apelotonamiento de fibras en pavimento de HRF.....	8
Figura 2.3. Tipos de texturas y formas de fibras.	9
Figura 2.4. Tipos de texturas y formas de fibras. De izquierda a derecha: fibra sintética de extremo enganchado, fibra de acero rizada, fibra sintética recta, fibra de acero de extremo enganchado.	9
Figura 2.5. Fibra sintética empaquetada en paquetes en la izquierda, y a granel en la derecha.....	10
Figura 2.6. Ejemplo de post agrietamiento de una viga de HRF sometida a flexión, usando una dosis de macrofibras sintéticas de 0,43% [Roesler et al., 2019].	19
Figura 2.7. Ejemplo de construcción de pavimento de hormigón con fibra en Iowa.	25
Figura 2.8. Flotas convencionales para utilizar en HRF. De izquierda a derecha: magnesio, radio y borde recto.	25
Figura 2.9. Ejemplo de apariencia de superficie de un pavimento de HRF.	26
Figura 2.10. Texturizado con capa de arpillera de un pavimento de hormigón reforzado con 2,4 kg/m ³ de fibra sintética.	27
Figura 2.11. Texturizado longitudinal con rastrillo de un pavimento de hormigón reforzado con fibra sintética.	27
Figura 2.12. Técnica de rectificado de diamantes para un pavimento de hormigón.	29
Figura 2.13. Configuración del ensayo ASTM C1609, mostrando el transductor LVDT en la parte superior de la mitad del vano de la viga.....	31
Figura 2.14. Geometría de la viga a utilizar en ASTM C1609.	32
Figura 2.15. Respuesta Carga – Deflexión de un ensayo ASTM C1609, utilizando una dosis de macrofibras sintéticas de 0,27%.....	33
Figura 2.16. Geometría de la viga a utilizar en el ensayo de la norma ASTM 1399, utilizando un plato de acero de 12 mm de espesor.	35
Figura 2.17. Ejemplo esquemático de respuesta carga – deflexión para la prueba ASTM C1399.....	36
Figura 2.18. Geometría de la viga de EN 14651.....	37

Figura 2.19. Configuración de la norma EN 14651, a la izquierda con un dispositivo de control de deflexiones LVDT, y a la derecha con un dispositivo de control de aperturas de grietas CMOD.	37
Figura 2.20. Respuesta Carga – CMOD para el ensayo EN 14651.	38
Figura 2.21. Configuración de la prueba ASTM C 1550 de panel redondo y su modo de falla.....	38
Figura 2.22. Configuración de la Prueba de Barcelona de Doble Punción, utilizando un extensómetro circunferencial para medir su desplazamiento total.	39
Figura 2.23. Ejemplo de diseño basado en ejes equivalentes para HRF ($R_{150} = 20\%$ o $f_{150} = 1 [MPa]$) y hormigón sin fibras con dos tamaños de losas (1.8 m y 1.2 m).	41
Figura 2.24. Vista del software “ERR” para un diseño de calle local.	42
Figura 2.25. Curvas de respuesta de Esfuerzo – Deflexión para distintas mezclas en un espécimen de 150x150x450 mm.	45
Figura 2.26. Tipos de fibras utilizadas en el ensayo ASTM C1609. A la izquierda se encuentra la macrofibra de Acero y a la derecha la de Polipropileno.....	46
Figura 2.27. Geometría y Refuerzo de Acero utilizado en las vigas de ensayo.	48
Figura 2.28. Respuestas Carga – Deflexión en la mitad del vano para vigas reforzadas de HRF de acero (izquierda), de vidrio (centro) y sintética (derecha).....	50
Figura 2.29. Tipos de refuerzos utilizados en el ensayo. (1) Fibra sintética recta. (2) Fibra de acero extremos enganchados. (3) Fibra de acero rizada. (4) Malla electrosoldada de $A_s = 1,2 \text{ cm}^2\text{m}$	51
Figura 2.30. Configuración del ensayo de losa cargada en el centro.....	52
Figura 2.31. Respuesta Carga – Deflexión para los seis especímenes.....	53
Figura 2.32. Configuración de ensayo para losa cargada en el borde.....	54
Figura 2.33. Respuesta Carga – Deflexión para ambas muestras ensayadas (línea azul y negra delgada). La línea negra gruesa muestra la respuesta de la muestra con fibra sintética cuando es cargada en el centro.	54
Figura 2.34. Ensayo acelerado de la Universidad de Illinois.	56
Figura 2.35. Ensayo acelerado de la Universidad de Illinois.	56
Figura 2.36. Estado final de los paños de losa de 9 cm. A la izquierda sin fibras y a la derecha con incorporación de fibras.	57

Figura 2.37. Porcentajes de falla para cada sección para ser usada en carreteras, calles o estacionamientos.	58
Figura 2.38. Situación final para las losas de la sección #2 (con fibra).....	59
Figura 2.39. Situación final para las losas de la sección #7 (sin fibra).....	59
Figura 2.40. Parada de Autobuses en Chicago, construida el año 2003.	61
Figura 2.41. Camino interior en el condado de Kane, construido el año 2004.	62
Figura 2.42. Avenida en Mundelein en el condado de Lake, construida el 2005.	62
Figura 2.43. Estacionamiento de la Universidad de Illinois, construido el año 2006.....	63
Figura 2.44. Ruta en el condado de Richland, construida el año 2010.....	63
Figura 2.45. Aplicaciones de pavimentos de hormigón reforzado con fibras en Europa.	64
Figura 2.46. Proyecto de hormigón reforzado con macrofibra BarChip48 en Turquía.	64
Figura 2.47. Plataforma del Aeropuerto de Palma de Mallorca, construida con hormigón reforzado con fibras.	65
Figura 3.1. Ubicación del proyecto.....	67
Figura 3.2. Espesores antiguos y actuales del proyecto de conservación de la calle de rodaje Kilo.....	68
Figura 3.3. Fibra BarChip48 a la izquierda y Sika Enduro Mirage a la derecha.	69
Figura 3.4. Interfaz del programa FAARFIELD donde se muestran los datos de entrada exigidos para el diseño de un pavimento de hormigón reforzado con fibras, además de los años de vida útil de diseño (parte superior) correspondiente a 20 años.	71
Figura 3.5. Interfaz del programa FAARFIELD al ingresar aeronaves, junto a su peso y despegues anuales.	72
Figura 3.6. Gráfico de CDF en función de la distancia lateral de las ruedas al eje central de la aeronave, el cual calza con el de la pista, para el diseño de pavimento de HRF.	73
Figura 3.7. Interfaz del programa FAARFIELD donde se muestran los datos de entrada exigidos para el diseño de un pavimento de hormigón convencional (sin fibra), además de los años de vida útil de diseño (parte superior) correspondiente a 20 años.....	73
Figura 3.8. Gráfico de CDF en función de la distancia lateral de las ruedas al eje central de la aeronave, el cual calza con el de la pista, para el diseño de pavimento convencional sin fibras.....	74
Figura 3.9. Programación de la conservación de la calle de rodaje Kilo sin utilizar fibra. ..	78

Figura 3.10. Programación de la conservación de la calle de rodaje Kilo utilizando HRF..	80
Figura A.1. Resumen de procedimientos de diseño existentes para recapados de hormigón..	93
Figura B.1. Ficha Técnica de la fibra BarChip48, hoja 1.	94
Figura B.2. Ficha Técnica de la fibra BarChip48, hoja 2.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tabla resumen para valores de longitud, diámetro, relación de aspecto y porcentaje de volumen ocupado de macrofibras y microfibras según diferentes autores.....	8
Tabla 2.2. Propiedades típicas de fibras sintéticas y de acero.....	12
Tabla 2.3. Cuadro comparativo para los distintos materiales fibrosos.	12
Tabla 2.4. Gradación de agregados recomendada para hormigón reforzado con fibra.	16
Tabla 2.5. Granulometría del Árido Fino aplicada en la DAP.	17
Tabla 2.6. Granulometría del Agregado Grueso aplicada en la DAP.	17
Tabla 2.7. Resultados del ensayo a flexión de la norma ASTM C1609 para dos tipos y dosis de macrofibras sintéticas.....	20
Tabla 2.8. Valores de resistencia residual del ensayo ASTM C1609 para HRF con diferentes tipos y dosis de fibras y edad de hormigón.	20
Tabla 2.9. Efecto del tipo y volumen de fibra y la edad del hormigón en la energía total de fractura, utilizando vigas de hormigón reforzado con fibra y sin reforzar.	21
Tabla 2.10. Valores de resistencia a flexión, resistencia residual y razón de resistencia residual para las 5 mezclas ensayadas.	45
Tabla 2.11. Tipos de fibras utilizadas en el ensayo ASTM C1609.....	46
Tabla 2.12. Contenido de fibra en cada mezcla realizada.	46
Tabla 2.13. Resistencia a flexión, Resistencia Residual y Tenacidad obtenida para cada mezcla mediante el ensayo ASTM C1609.	47
Tabla 2.14. Características de las fibras utilizadas en el ensayo ASTM C1609.	47
Tabla 2.15. Resultados de resistencia a compresión (ASTM C39), resistencia a flexión, resistencia residual y tenacidad mediante el ensayo ASTM C1609.	48
Tabla 2.16. Características de las fibras utilizadas en el ensayo con vigas reforzadas.....	49
Tabla 2.17. Tipos de mezclas a ensayar junto a sus dosis de fibra.	49
Tabla 2.18. Resultados obtenidos del ensayo de vigas de hormigón reforzado con acero convencional y macrofibra estructural.....	49
Tabla 2.19. Componentes de la mezcla de hormigón. $f'c = 35 [MPa]$, $MOR = 5 [MPa]$	51
Tabla 2.20. Características de las fibras utilizadas en el ensayo.....	52
Tabla 2.21. Resultados del ensayo de losa cargada en el centro para cada muestra	53

Tabla 2.22. Resultados numéricos del ensayo para cada muestra cuando son cargadas en el borde.....	55
Tabla 2.23. Porcentaje de agrietamiento en los paños de losa de 9 cm sin fibra y con fibra, en función de la carga aplicada, el número de pasadas y los ejes equivalentes.....	57
Tabla 2.24. Resumen de los principales beneficios del hormigón reforzado con fibras según algunos investigadores.....	61
Tabla 3.1. Dimensiones de la calle de rodaje Kilo.....	68
Tabla 3.2. Características y precios para la fibra BarChip48 y Sika Enduro Mirage.	69
Tabla 3.3. Dosis y resistencias residuales para cada tipo de fibra.	69
Tabla 3.4. Resistencia a flexión efectiva para cada dosis de ambas macrofibras.	70
Tabla 3.5. Solicitaciones para diseñar el pavimento de hormigón reforzado con fibras en Aeropuerto Arturo Merino Benítez.....	72
Tabla 3.6. Espesor de diseño calculado por el programa FAARFIELD para cada dosis de cada fibra BarChip o Sika.....	74
Tabla 3.7. Volumen de hormigón y cantidad de fibra necesaria para cubrir la superficie de la Calle de Rodaje Kilo.....	75
Tabla 3.8. Costo del hormigón reforzado con fibras por metro cúbico y volumen total.....	76
Tabla 3.9. Cubicación y presupuesto para la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón sin fibras. Precios equivalentes al costo directo, no incluyen gastos generales ni IVA.	77
Tabla 3.10. Rendimientos para cada ítem junto a sus días de trabajo.	77
Tabla 3.11. Gastos Generales para 9 meses de la obra de conservación de la calle rodaje Kilo utilizando hormigón sin fibra. Precios sin IVA.....	78
Tabla 3.12. Total neto y con IVA incluido para la obra utilizando hormigón sin fibra.	79
Tabla 3.13. Cubicación y presupuesto para la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón reforzado con fibras sintéticas BarChip48. Precios equivalentes al costo directo, no incluyen gastos generales ni IVA.	79
Tabla 3.14. Rendimientos para cada ítem junto a sus días de trabajo.	80
Tabla 3.15. Valor total neto y con IVA incluido para la obra utilizando hormigón sin fibra..	81
Tabla 3.16. Ahorro del ítem “Construcción de Pavimento de Hormigón” al utilizar o no hormigón reforzado.....	81

Tabla 3.17. Ahorro del proyecto de conservación de la calle de rodaje Kilo al utilizar o no hormigón reforzado.....	82
Tabla 3.18. Ahorro del proyecto completo, pista y calle de rodaje, al utilizar o no HRF. ...	82

GLOSARIO

Aeródromo:	Toda área delimitada, terrestre o acuática habilitada por la autoridad aeronáutica y destinada a la llegada, salida y maniobra de aeronaves en la superficie.
Aeropuerto:	Aeródromo público que se encuentra habilitado para la salida y llegada de aeronaves en vuelos internacionales.
Área de Movimiento:	Parte del aeródromo utilizada para el despegue, aterrizaje y rodaje de aeronaves, integrada por el área de maniobras y las plataformas existentes.
ASTM:	American Society for Testing and Materials
Calle de Rodaje:	Vía definida en un aeródromo terrestre, establecida para el rodaje de aeronaves y destinada a proporcionar enlace entre una y otra parte del aeródromo.
CMOD:	Crack Mouth Opening Displacement.
CR:	Calle de Rodaje.
DAP:	Dirección de Aeropuertos.
ERR:	Estimador de Resistencia Residual.
FAA:	Federal Aviation Administration
FAARFIELD:	Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design.
HRF:	Hormigón Reforzado con Fibras.
HRFA:	Hormigón Reforzado con Fibras de Acero.
LVDT:	Linear Variable Displacement Transducer.
MOP:	Ministerio de Obras Públicas.
Pista:	Área rectangular definida en un aeródromo terrestre preparada para el aterrizaje y el despegue de las aeronaves.
Plataforma:	Área definida en un aeródromo terrestre destinada a dar cabida a las aeronaves para los fines de embarque o desembarque de pasajeros, correo o carga, abastecimiento de combustible, estacionamiento o mantenimiento.
PP:	Polipropileno.
Resistencia Residual:	Resistencia retenida presente en el hormigón luego de traspasar su capacidad máxima de carga, dada la presencia de fibras estructurales.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

La incorporación de fibras a la mezcla de hormigón se denomina hormigón reforzado con fibras (HRF). Esta tecnología se introdujo hace varias décadas y se ha implementado en distintas aplicaciones, como carreteras, calles, estacionamientos, revestimiento de pavimentos y puentes, plataformas de autobuses, pisos industriales, aeródromos, hormigón lanzado, estabilización de taludes, elementos prefabricados, entre otras cosas. Las primeras investigaciones sobre el tema comenzaron entre los años 50 y 60. En la década de los 70 en Estados Unidos se hicieron los primeros estudios e investigaciones dirigidos al uso del hormigón reforzado con fibras, las que desde entonces han sido elementos indispensables en la construcción de pisos industriales de alto desempeño. La primera aplicación de esta tecnología a escala real, utilizando fibras de acero, llega el año 1971 en una estación de pesaje de camiones en Ohio, EE. UU. Luego en 1972 se construyeron dos cubiertas para puentes en Pensilvania que aún siguen en servicio. Las siguientes aplicaciones consistieron en cubiertas para aeródromos de la marina de EE. UU., y cubiertas en aeropuertos comerciales en las décadas de 1970 y 1980. Desde entonces, las fibras han tomado relevancia y se han utilizado en múltiples aplicaciones.

Actualmente en Chile, según el levantamiento realizado por la DAP en 2019, existen 6.46 millones de metros cuadrados de pavimentos aeroportuarios en el área de movimiento de la Red Nacional de la Dirección de Aeropuertos, donde un 40% corresponde a pavimentos de hormigón, cuyos espesores varían entre 30 a 45 centímetros [www.aeropuertos.mop.gob.cl]. Sin embargo, con el paso del tiempo los pavimentos se han visto más solicitados por mayores cargas, ya sea por aeronaves más grandes o mayor frecuencia de operaciones, lo que ha generado un constante aumento en los espesores de pavimento, así como también en los costos y tiempos de construcción, por lo tanto, se hace necesario innovar en tecnologías de pavimentación que puedan ayudar a reducir espesores, disminuyendo los costos asociados al proyecto, manteniendo los mismos estándares de calidad. Lo anterior se puede lograr mediante el uso de Hormigón Reforzado con Fibra (HRF), el cual permite optimizar el espesor de losa, agregando fibras para el control de fisuras por fatiga, aumentando la capacidad última de carga y la resistencia del material.

Existen varios tipos de fibras disponibles actualmente en el mercado, sin embargo, las fibras más utilizadas son las de acero y las de polipropileno (sintéticas). Estas fibras se encuentran en variedad de longitudes, formas, tamaños y espesores, y se adhieren al hormigón durante el proceso de mezclado; mientras mejor sea su adherencia, tendrá mejores resultados en sus propiedades. Además, el uso de fibra tiene mayores facilidades respecto del uso de malla electrosoldada

comúnmente utilizada, ya que no hay que preocuparse de la ubicación de la malla, dado que las fibras se distribuyen en todo el concreto.

La tecnología de HRF para pavimentos se ha utilizado durante décadas en el mundo, sin embargo, en Chile se ha implementado recientemente con mayor fuerza en algunas aplicaciones de Shotcrete y Caminos de la Dirección de Vialidad, como la Ruta G-84 en la Región de Valparaíso o la Ruta 7 en las regiones de Aysén y Magallanes, entre otros [www.ich.cl].

Los principales objetivos del HRF son mejorar el comportamiento post – fisuración del pavimento disipando mayor cantidad de energía antes de fallar, aumentando la resistencia al agrietamiento, al impacto, y la tenacidad del pavimento, lo que permite una reducción en el espesor de losas [Roesler et al. 2019]. Además, con el uso de HRF se controla la apertura de grietas [Plizzari et al., 2019] y el nivel de deformaciones, permitiendo al hormigón alcanzar mayores solicitaciones. Lo anterior se traduce en un aumento de la durabilidad o vida útil del pavimento, mejorando el desempeño respecto de un pavimento de hormigón sin fibra [Roesler et al. 2019].

1.2 Objetivos

1.2.1 Principal

El objetivo principal de este tema de memoria, que nace en el marco del Convenio de Colaboración entre la Universidad Técnica Federico Santa María y la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas, es estudiar la factibilidad técnica – económica para implementar pavimentos de hormigón reforzados con fibra en los pavimentos de Aeropuertos de Chile, principalmente en las plataformas o calles de rodaje del área movimiento a lo largo de la Red Nacional Aeroportuaria.

1.2.2 Secundarios

Para lograr lo anteriormente mencionado, se deben alcanzar los siguientes objetivos secundarios:

- Realizar un estudio que contenga una completa revisión bibliográfica del tema propuesto, basado en la experiencia nacional como internacional, identificando parámetros desde la literatura de diseño estructural, especificaciones de mezcla y construcción de un pavimento de hormigón reforzado con fibra en plataformas o calles de rodaje.
- Evaluar la factibilidad técnica – económica para implementar este tipo de pavimentos en los Aeropuertos de Chile, por sobre un pavimento de hormigón convencional sin fibra.

- Desarrollar un borrador de propuesta para postulación a proyecto Fondef IDEA para la investigación y desarrollo del uso de hormigón reforzado con fibra en pavimentos aeroportuarios en el futuro.

1.3 Alcances del Estudio

En el presente estudio, se dan a conocer las herramientas necesarias y conceptos importantes relacionados con la implementación de pavimentos de hormigón reforzado con fibras para llevar a cabo su correcta aplicación en los aeropuertos de Chile, principalmente en las plataformas y calles de rodaje. Lo anterior, tomando como punto de partida el correcto funcionamiento de la implementación de HRF en pavimentos y los ensayos realizados, ya sea en laboratorio con la norma ASTM C1609 o ensayos a escala real, realizados en el mundo. Realizar ensayos ASTM C1609 en laboratorio no forma parte de esta investigación.

Con la ayuda de un detallado estudio bibliográfico se logra evaluar la factibilidad técnica – económica de implementar pavimentos de hormigón reforzado con fibras en plataformas o calles de rodaje de aeropuertos en Chile, en lugar de utilizar losas de hormigón convencional.

Finalmente, este tema de memoria servirá como base para desarrollar un borrador de propuesta para una futura postulación a proyecto Fondef IDEA para investigación y desarrollo del uso de HRF en pavimentos aeroportuarios en Chile.

1.4 Metodología de Trabajo

Para llevar a cabo el tema de memoria y cumplir con los objetivos propuestos anteriormente, es necesario llevar a cabo la siguiente metodología de trabajo:

Estudio bibliográfico para establecer el estado del arte y de la práctica: efectuar la recopilación, traducción y lectura del material bibliográfico en distintos continentes acerca de la tecnología de hormigón reforzado con fibra (ensayos realizados, informes técnicos, etc.). Además de llevar a cabo la síntesis y elaboración de presentaciones de distintas investigaciones a lo largo del tiempo.

Definición de parámetros de diseño y especificaciones de construcción: se lleva a cabo la redacción de las recomendaciones propuestas de diseño y construcción para pavimentos de hormigón reforzado con fibra, en base a la experiencia nacional como internacional.

Evaluación de factibilidad: se realiza un análisis económico para evaluar la factibilidad de implementar pavimentos de hormigón reforzado con fibra en aeropuertos, contrastado con la alternativa tradicional de pavimentación de hormigón sin fibra. Para esto es necesario realizar las consultas pertinentes a los proveedores de fibras en Chile y a las plantas de Cemento que implementen esta tecnología.

1.5 Estructura de la Tesis

Esta tesis se encuentra estructurada básicamente en 4 capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

Capítulo 1 presenta los antecedentes generales asociados a la implementación de pavimentos de hormigón reforzado con fibras, además, se dan a conocer los objetivos que se buscan cumplir, los alcances del estudio y la metodología de trabajo que se debe llevar a cabo.

Capítulo 2 detalla una revisión bibliográfica asociada al hormigón reforzado con fibras estructurales para aplicaciones de pavimentos. Se especifican las fibras utilizadas, el comportamiento del HRF en estado fresco y endurecido, los cambios a realizar en el proceso de mezcla o construcción, los ensayos que se realizan en este tipo de mezclas, la metodología de diseño que se debe llevar a cabo, resultados de ensayos realizados en el mundo, además de los beneficios de utilizar HRF y algunas aplicaciones implementadas en distintos continentes.

Capítulo 3 exhibe la factibilidad técnica – económica de implementar pavimentos de hormigón reforzado con fibras en calles de rodaje de aeropuertos, utilizando un proyecto específico del año 2018 en el aeropuerto Arturo Merino Benítez. Se presentan los antecedentes del proyecto, la cotización de fibras estructurales, el diseño del espesor de pavimento de HRF utilizando el programa FAARFIELD y finalmente la factibilidad técnica – económica del uso de HRF en Aeropuertos.

Capítulo 4 presenta las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se lleva a cabo la revisión bibliográfica del hormigón reforzado con fibras estructurales para aplicaciones de pavimentos. Se detallan las características y tipos de fibras empleadas, el comportamiento del HRF en estado fresco y endurecido, los cambios que se deben realizar en una mezcla de hormigón reforzado con fibra y en su construcción, además de los métodos de prueba o ensayos que se deben realizar a este tipo de mezclas. También se especifica la metodología de diseño para pavimentos de este material, algunos ensayos realizados en laboratorio y escala real, los importantes beneficios que se obtienen al incluir fibra en la mezcla y finalmente algunas aplicaciones de pavimentos de hormigón con fibra en Chile y el resto del mundo.

2.1 Características y Tipos de Fibras

El hormigón reforzado con fibra se refiere al hormigón que contiene fibras discretas que se distribuyen y orientan aleatoriamente en la matriz de hormigón. La elección del tipo de fibra a utilizar en pavimentos puede ser un desafío, debido a la amplia variedad de fibras que existen, y que cada tipo de fibra producirá propiedades diferentes para una mezcla de hormigón determinada.

Los principales aspectos que se consideran a la hora de escoger fibras son la geometría (longitud (L), diámetro (d), relación de aspecto (L/d)), textura y tipo de material. En la Figura 2.1 se muestra un mapa conceptual que resume y clasifica las fibras según tamaño, materialidad, textura y forma. Dentro de la clasificación según el tamaño, se encuentran las macrofibras y microfibras, que se diferencian en sus diámetros y longitudes. Además, se encuentra una amplia variedad de formas y texturas, que pueden venir empaquetadas o a granel y pueden ser de distintos materiales fibrosos como el acero, vidrio, sintéticas y naturales.

Actualmente, las fibras más utilizadas en aplicaciones de pavimentos son las fibras sintéticas de polipropileno y de acero [Roesler et al., 2019].

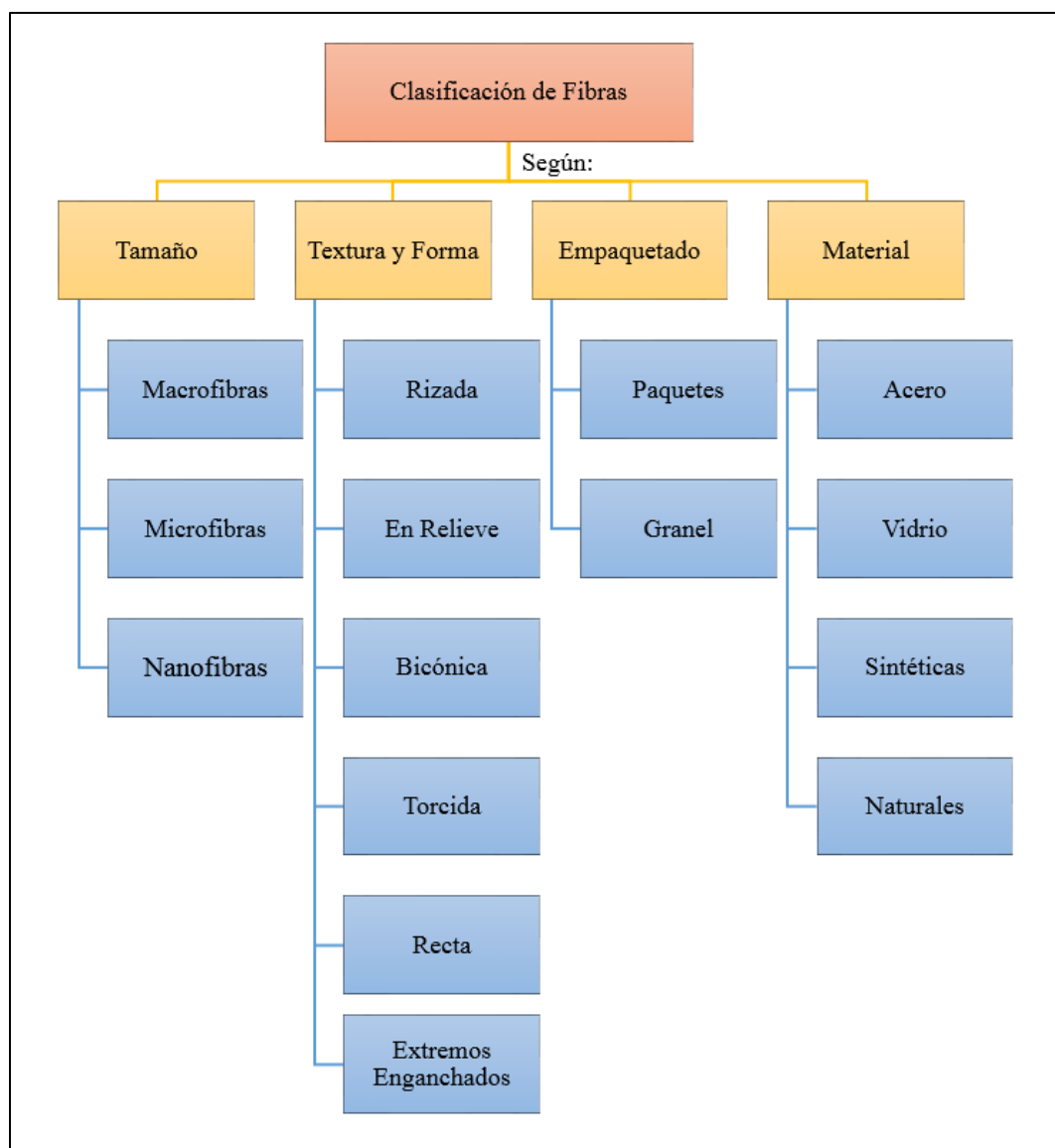


Figura 2.1. Resumen conceptual de las distintas clasificaciones de fibras.

2.1.1 Clasificación según Tamaño

Las fibras pueden ser clasificadas según tres categorías generales: macrofibras, microfibras y nanofibras. Las macrofibras son utilizadas para mejorar la respuesta estructural del pavimento, principalmente mejorar la tenacidad y dureza. Por otro lado, las microfibras pueden ser usadas para mitigar o reducir el agrietamiento plástico en el hormigón, pero no ofrece beneficios estructurales. Finalmente, las nanofibras no son actualmente viables para aplicaciones de pavimentos de hormigón, por lo que no se profundizarán [Roesler et al., 2019; López, 2015; Sika, 2008; Dirección de Vialidad, 2008].

La longitud, diámetro, y relación de aspecto de las macrofibras pueden variar ligeramente dependiendo del lugar que se fabrique. Investigadores de Estados Unidos e Italia, precisan que las macrofibras tienen longitudes desde 20 a 80 mm y diámetros desde 0,3 a 1 mm, mientras que las microfibras tienen diámetro menor a 0,3 mm y longitud entre 38 a 57 mm, es decir, las macrofibras son más largas y de mayores diámetros que las microfibras [Roesler et al., 2019; Conforti y Plizzari, 2018; Harrington y Fick, 2014].

En Chile, la Dirección de Vialidad especifica que las microfibras tienen diámetro menor a 0,1 mm y las macrofibras entre 0,2 y 0,8 mm [Dirección de Vialidad, 2018]. Por otro lado, en proyectos de pavimentos de hormigón reforzado con fibra llevados a cabo en Chile se han utilizado fibras de las marcas SIKa y BarChip. La empresa suiza SIKa, establece que las macrofibras tienen diámetros entre 0,05 y 2 mm, mientras que las microfibras tienen diámetros entre 0,023 y 0,05 mm. Por otra parte, la empresa irlandesa Barchip, dedicada a reforzar el hormigón con fibras en más de 20 países en el mundo, fabrica solo macrofibras sintéticas de 40 a 60 mm de longitud y diámetros entre 0,3 y 1 mm, para aplicaciones de pavimentos. En la Tabla 2.1 se resume la clasificación por tamaño según cada investigador.

Una característica importante a conocer es la relación de aspecto de la fibra, es decir, la razón entre la longitud de la fibra y su diámetro, esto porque va a influenciar en la capacidad de adhesión con la mezcla de hormigón y por lo tanto en la tenacidad que resultará del hormigón reforzado con fibras. A mayor relación de aspecto, mayor superficie entre el hormigón y la fibra, por lo que se obtiene una mejor adherencia y mejores resultados de comportamiento en el HRF, en casos con fibras de alta relación de aspecto, la adherencia es tan fuerte que la fibra podría romperse antes de despegarse del hormigón. Mientras que una fibra con baja relación de aspecto podría ser extraída del hormigón antes de que éste alcance totalmente a absorber energía, dado que no alcanza a adherirse correctamente. Se debe tener cuidado con no utilizar fibras con grandes relaciones de aspecto, ya que esto aumenta el potencial de que se produzca apelotonamiento (Figura 2.2), lo cual sucede cuando las fibras se unen en grupos durante el proceso de mezclado y causa problemas de consolidación y distribución no uniforme de la mezcla [Roesler et al., 2019]. Dado lo anterior es que un rango adecuado de relación de aspecto en fibras es de 30 a 100 [Roesler et al., 2019] o de 20 a 100 [Sika, 2008], mientras que otras investigaciones han determinado que una relación de aspecto óptima varía de 40 a 80 [Barchip, s.f.; Conforti y Plizzari, 2018; López, 2015].



Figura 2.2. Ejemplo de Apelotonamiento de fibras en pavimento de HRF.

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestran las comparaciones entre distintos autores para valores de longitud, diámetro, relación de aspecto y porcentaje de volumen ocupado para microfibras y macrofibras. Cabe destacar que el porcentaje de volumen mostrado corresponde al volumen que ocupa el total de fibra en el volumen total de la mezcla de hormigón.

Tabla 2.1. Tabla resumen para valores de longitud, diámetro, relación de aspecto y porcentaje de volumen ocupado de macrofibras y microfibras según diferentes autores.

Tipo de fibra	Característica	Roesler et al., 2019	Conforti y Plizzari, 2018	López, 2015	Utilizadas en Chile		
					Jeria, 2008 (Vialidad)	Sika, 2008	Barchip, 2020
Macrofibras	Longitud [mm]	20 - 80	20 - 80	20 - 80	-	-	40 - 60
	Diámetro [mm]	0,3 - 1	0,3 - 1	> 0,3	0,2 - 0,8	0,05 - 2	0,3 - 1
	Relación de Aspecto	30 - 100	40 - 80	40 - 80	<100	20 - 100	40 - 80
	Volumen [%]	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	0,25 - 2	-	0,2 - 0,8	< 0,5
Microfibras	Longitud [mm]	38 - 57	38 - 57	20 - 60	-	-	-
	Diámetro [mm]	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,1	0,023 - 0,050	-
	Relación de Aspecto	30 - 100	40 - 80	40 - 80	< 100	20 - 100	-
	Volumen [%]	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	0,25 - 2	-	0,2 - 0,8	-

Al revisar los valores expuestos en la Tabla 2.1, es posible considerar valores que engloben los definidos por cada investigador o autor. Esto se traduce en una macrofibra adecuada para aplicaciones de pavimentos, la cual tendría longitud entre 20 y 80 mm, valores de diámetro entre 0,3 y 0,8 mm, relación de aspecto entre 40 y 80 y un volumen de fibra entre 0,25 y 0,5% del volumen total de la mezcla.

2.1.2 Clasificación según Textura y Forma

Se pueden fabricar fibras de varios tamaños, texturas y relieves. Estas diferentes características geométricas están destinadas a proporcionar adherencia o fricción entre las fibras y la mezcla. Existen las fibras sintéticas del tipo monofilamento, donde todos los filamentos de la fibra tienen misma longitud, del tipo multifilamento, que corresponde a una mezcla de monofilamentos de diferentes longitudes, y del tipo fibriladas, correspondiente a una red ramificada para tener mejor superficie [Roesler et al., 2019]. Algunas distintas formas y largos, en pulgadas, de distintas macrofibras se pueden ver en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Tipos de texturas y formas de fibras.

En la Figura 2.3 se observan las siguientes texturas de izquierda a derecha: fibra sintética rizada, fibra sintética en relieve, fibra sintética bicónica, fibra sintética torcida, fibra sintética recta fibrilada corta y larga, fibra de acero con extremos enganchados, fibra de acero rizada y fibra torcida de basalto. [Roesler et al. 2019]

En la Figura 2.4 se puede observar los tipos de fibra, y sus dimensiones, fabricadas por la empresa Sika [Sika, 2008].



Figura 2.4. Tipos de texturas y formas de fibras. De izquierda a derecha: fibra sintética de extremo enganchado, fibra de acero rizada, fibra sintética recta, fibra de acero de extremo enganchado.

Fibras sintéticas y de acero pueden encontrarse en formas de relieve, torcidas, rizadas y de extremo enganchado [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018; Conforti y Plizzari, 2018; López, 2015; Sika, 2008; Dirección de vialidad, 2008]. De estudios con fibras sintéticas de polipropileno se ha concluido que las fibras con textura deformada, tipo rizada o en relieve, ofrecen mejores propiedades de adherencia en comparación con otros tipos de texturas y formas [Won, 2006].

La empresa Barchip, que ha realizado proyectos en Chile, en Codelco y Alto Maipo, tiene para ofrecer dentro de su amplia gama de fibras, solo fibras en continua forma de relieve, por sus grandes propiedades de adherencia [Barchip, s.f.].

2.1.3 Clasificación según Empaquetado

El empaquetado de las fibras depende del tipo de fibra y su manufacturación. Aunque el proceso de envasado no cambia el propósito de la fibra, puede afectar la dispersión de las fibras, las propiedades en fresco y las propiedades endurecidas del hormigón. Las fibras sintéticas se pueden empaquetar sueltas o en paquetes, mientras que las fibras de acero se empacan también a granel o en paquetes o manojos pegados. Este pegamento suele ser soluble en agua y no debería afectar el rendimiento de la mezcla hormigón reforzado con fibra [Roesler et al., 2019].

En la Figura 2.5 se observa como pueden ser empaquetadas las macrofibras sintéticas [Roesler et al., 2019].



Figura 2.5. Fibra sintética empaquetada en paquetes en la izquierda, y a granel en la derecha.

2.1.4 Clasificación según Tipo de Material Fibroso

La norma ASTM C1116, “Especificaciones Generales para Hormigón Reforzado con Fibra”, define cuatro tipos de materiales fibrosos: sintético, acero, vidrio o natural [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018; Conforti y Plizzari, 2018; López, 2015; Barchip, s.f.; Sika, 2008]. A continuación, se definen los cuatro tipos de materiales.

- **Tipo I:** “Hormigón reforzado con fibra de acero”. Esta clasificación corresponde a hormigón reforzado con fibras de acero, aleaciones o acero inoxidable. Este tipo de material debe cumplir los requisitos de la norma ASTM A820 “Especificaciones Generales para Fibras de Acero en Hormigón Reforzado con Fibras”.
- **Tipo II:** “Hormigón reforzado con fibras de vidrio”. Corresponde a hormigón reforzado con fibra de vidrio resistente al álcali. Debe cumplir con lo expuesto en la norma ASTM C1666 “Especificaciones Generales para Fibras de Vidrio Resistentes al Álcali para Hormigón Reforzado con Fibras”.
- **Tipo III:** “Hormigón reforzado con fibras sintéticas”. Compete a hormigón reforzado con fibras sintéticas resistentes al deterioro ambiental, como humedad, alcalinidad o químicos, a lo largo de la vida útil del pavimento. Actualmente, solo las fibras de Poliolefina tienen norma para usos en hormigón, la norma ASTM D7508 “Especificaciones Generales para Fibras de Poliolefina para uso en Hormigón”.
- **Tipo IV:** “Hormigón reforzado con fibras naturales”. Corresponde a hormigón reforzado con fibras naturales resistentes al deterioro ambiental, como humedad, alcalinidad o químicos, a lo largo de la vida útil del pavimento. Algunas fibras naturales son fabricadas a partir de bambú, cáñamo, celulosa y basalto. Actualmente solo las fibras naturales de celulosa tienen norma para usos en hormigón, la norma ASTM D7357 “Especificaciones Generales para Fibras de Celulosa para Hormigón Reforzado con Fibras”.

Para aplicaciones de pavimentos de hormigón reforzado con fibras, predomina el uso de fibras sintéticas y de acero [Roesler et al., 2019; Conforti y Plizzari, 2018], mientras que en Chile principalmente se utilizan fibras sintéticas para construcción de pavimentos de hormigón reforzados [Sika, 2008; Barchip, s.f.]. Algunas propiedades típicas de estas fibras se muestran a continuación en la Tabla 2.2 [Bentur y Mindess, 2007; Banthia et al., 2012].

Tabla 2.2. Propiedades típicas de fibras sintéticas y de acero.

Tipo de Fibra	Material	Resistencia a la Tracción [MPa]	Módulo Elástico [GPa]	Deformación Axial [%, máx. a min.]	Diámetro Fibra [μm]	Adhesión
Sintética	Polipropileno	200 a 700	3,5 a 10	15 a 10	10 a 150	Buena
	Alcohol de Polivinilo	800 a 1500	29 a 36	10 a 6	14 a 600	Excelente
	Polietileno	400	5	400 a 100	300 a 1000	Buena
Acero	Acero al Carbono	1000	210	2 a 1	50 a 85	Excelente
	Acero Inoxidable	1000	210	2 a 1	50 a 85	Excelente

Generalmente, para que el hormigón reforzado con fibra tenga mayor resistencia, módulo elástico o propiedades de tenacidad, las macrofibras deberían tener propiedades similares o mejores que las de un hormigón sin fibra. Dado que el módulo elástico de un hormigón sin fibra puede variar entre 27,6 a 41,4 GPa, se observa en la Tabla 2.2 que las fibras de acero tienen mejores valores de módulo elástico que el hormigón sin fibra, mientras que las fibras sintéticas tienen un módulo elástico menor o igual a éste. Con el tiempo se han desarrollado nuevas fibras sintéticas en E.E.U.U. de “Alta Tenacidad”, las cuales tienen un ligero aumento en el valor del módulo elástico y resistencia en comparación con las típicas fibras sintéticas [Roesler et al., 2019].

A continuación, se detallan las características de las fibras sintéticas, de acero, natural y vidrio. Además, a modo resumen, se presenta en la Tabla 2.3, los distintos tipos de fibra, donde se muestran sus dosis en aplicaciones de pavimentos, además de sus ventajas y desventajas.

Tabla 2.3. Cuadro comparativo para los distintos materiales fibrosos.

Material	Sintética	Acero	Natural y Vidrio
Dosis usadas en pavimentos [kg/m3]	1,77 a 3	17,8 a 41,5	No se utilizan en pavimentos
Ventajas	Bajo costo monetario. Alta resistencia a la alcalinidad.	Alto módulo de elasticidad. Excelente Adhesión.	Proviene de una fuente orgánica. Menor impacto ambiental.
Desventajas	Bajo módulo de elasticidad. En altas dosis puede provocar apelmazamiento.	Alto costo monetario. Problemas de corrosión. Dificultad de introducir la fibra. Deterioro de máquinas.	No han sido aplicadas a proyectos de pavimentación.

2.1.4.1 Fibra Sintética

La fibra sintética es el tipo de fibra más utilizado en aplicaciones de pavimentos, cerca de un 92% de los recapados de hormigón reforzado con fibra en E.E.U.U contienen fibra sintética [Hansen, 2016]. En Chile, solo se utilizan fibras sintéticas para construir pavimentos de hormigón dada sus ventajas frente a las fibras de acero [Barchip, s.f.; Sika, s.f.]. Estas fibras corresponden a polímeros, como polipropilenos, poliolefinas, poliéster o mezclas de polímeros. No afectan al contenido de agua en la mezcla dado que no absorben humedad, sin embargo, podrían afectar en altas dosis, provocando apelotonamiento (Figura 2.1) [Roesler et al. 2019].

La dosis de fibra se define por la cantidad, en kilogramos, de fibra por metro cúbico de mezcla. En aplicaciones de pavimentos, la dosis de fibra varía desde 1,77 a 3 kg/m³, pero de igual forma se pueden utilizar en cantidades más altas, siempre que se utilice el suficiente cemento para cubrir todas las fibras y se controle el apelotonamiento [Harrington y Fick, 2014].

Polipropileno y polietileno son comúnmente las fibras disponibles en el comercio y son clasificadas como poliolefinas en la norma ASTM D7508, ambas son dos aceptables tipos de fibras para uso en mezclas de hormigón reforzado con fibra. En la norma ASTM, se especifica que el término poliolefina se usa para describir polímeros de cualquier largo catenario, conteniendo al menos un 85% de etileno y/o unidades de monómero polipropileno. A continuación, se muestran algunas características de cada material sintético [Roesler et al., 2019].

- **Polipropileno (PP):** algunas ventajas del polipropileno son su bajo costo, alta resistencia a la alcalinidad, alto punto de fusión (165°C), mientras que sus desventajas son su bajo módulo de elasticidad [Bentur y Mindess, 2007]. Está disponible en varias formas como monofilamentos y fibriladas. Es hidrofóbico, lo cual afecta la dispersión y las propiedades de adhesión. Se recomienda utilizar un volumen de fibras de polipropileno máximo de 0.5% para no alterar las propiedades de la mezcla.
- **Polietileno (PE):** la mayoría de las fibras de polietileno tienen un módulo elástico de 5 GPa, aunque se han reportado casos de fibras con módulos más altos (15 a 31 GPa). Similar a las fibras de polipropileno, en altas dosis se puede provocar apelotonamiento, por lo tanto, no se recomienda utilizar más de un 0,5% de volumen de fibras en la mezcla.
- **Poliolefina:** es una combinación entre polipropileno (PP) y polietileno (PE). Se rigen por la norma ASTM D7508, la cual clasifica las fibras de poliolefina en micropoliolefina, macropoliolefina e híbridas (mezcla entre micro y macropoliolefinas). Las microfibras tienen un diámetro menor a 0,3 mm y longitud entre 3 a 50 mm. Las macrofibras tienen diámetros mayores a 0,3 mm y longitud entre 12 a 65 mm.

- **Alcohol de polivinilo (PVA):** estas fibras tienen alta resistencia y alto módulo de elasticidad. Dado que es naturalmente hidrofóbico, se adhieren bien con el cemento. De igual forma que los otros tipos de materiales sintéticos, se recomienda utilizar dosis de hasta 0,5% de volumen de fibra en la mezcla.

2.1.4.2 Fibra de Acero

El hormigón reforzado con fibras de acero se ha estudiado desde los años 60, inicialmente como método de reemplazo de reforzamiento secundario para controlar el agrietamiento, pero más tarde se descubrieron los beneficios en la tenacidad [Bentur y Mindess, 2007]. Las dosis usuales de fibras de acero para aplicaciones de pavimentos varían desde 17,8 a 41,5 kg/m³, siempre cuidando que el volumen máximo de fibras en la mezcla sea 0,5% [Roesler et al., 2019].

Las fibras de acero han sido usadas históricamente en recapados de hormigón reforzado con fibra, pero recientemente las fibras sintéticas han tomado relevancia en estas aplicaciones. Algunas de las explicaciones se deben a preocupaciones relacionadas con el potencial corrosivo de las fibras de acero [Marcos-Mesón et al., 2018], además de que la fibra de acero pueda pinchar neumáticos en la superficie, dificultad en introducir la fibra en el proceso de mezcla, y el alto costo de la fibra de acero versus la fibra sintética.

Teóricamente, la alta alcalinidad del hormigón protege a la capa pasiva de las fibras de acero, previniendo su corrosión. Sin embargo, algunos mecanismos de degradación, como la carbonatación o el ingreso de cloruro afecta esta capa y puede aumentar el riesgo de corrosión, especialmente cerca de la superficie y en la presencia de grietas anchas [Marcos-Mesón et al., 2018]. Las fibras de acero inoxidable y acero revestido reducen el riesgo de corrosión, pero son más costosas. Con un diseño apropiado de mezcla y elección de fibra, la probabilidad de que se corroan las fibras internas puede minimizarse. Además, se han reportado muchas aplicaciones de hormigón reforzado con fibra de acero exitosamente [Roesler et al., 2019].

No hay evidencia de que las fibras de acero pinchen neumáticos, principalmente porque en la superficie las fibras suelen desprenderse fácilmente o corroerse y quebrarse ya que están expuestas directamente al ambiente [Roesler et al., 2019]. Para proyectos de pavimentos, macrofibras sintéticas son más simples de introducir al proceso de mezclado y son preferidas a la hora de elegir entre ambos tipos, además, dada su alta densidad, una cantidad más grande de fibras de acero se requieren para el mismo volumen de fibras sintéticas [Sika, s.f.; Barchip, s.f.].

La norma ASTM A820, “Especificaciones Generales para Fibras de Acero en Hormigón Reforzado con Fibra”, clasifica las fibras de acero en 5 tipos. Estas clasificaciones se basan en el proceso usado para producir la fibra e independiente de la clasificación, la fibra puede ser recta o

deformada. Fibras rectas son menos común en hormigón reforzado con fibra dado que una mejor adhesión se logra con fibras deformadas, como en relieve, rizadas, de extremos enganchados o alargados [Roesler et al., 2019].

2.1.4.3 Fibra Natural, de Vidrio y otras Fibras

Las fibras naturales son producidas o procesadas desde una fuente orgánica, como celulosa, coco, cáscara, cáñamo, yute, bambú, etc. Un laboratorio mostró que las microfibras de celulosa pueden reducir y eliminar potencialmente el agrietamiento en un pavimento de hormigón reforzado con fibra [Banthia y Gupta; 2006]. Algunos otros tipos de fibra, como vidrio, carbón y minerales (asbestos o basaltos) han sido estudiados para uso en hormigón, pero no han sido aplicados significativamente a pavimentos [Roesler et al., 2019].

2.2 Comportamiento del Hormigón Reforzado con Fibras

Generalmente, las propiedades del hormigón reforzado con fibras son influenciadas por la fibra, por la mezcla de hormigón y por la interacción entre las fibras y el hormigón. A continuación, se detallan las propiedades generales en fresco y endurecido que se esperan de un hormigón reforzado con fibras.

2.2.1 Propiedades de Hormigón Reforzado con Fibra en Estado Fresco

2.2.1.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad de un hormigón reforzado con fibra se refiere a cuán rápida puede ser mezclada, posicionada, consolidada y terminada la mezcla. Algunos factores que influyen en la trabajabilidad son el tipo de fibra y su longitud, la dosis de fibra, y los agregados de la mezcla. Para volúmenes de fibra moderados a altos (menores a 1,5%) se espera una pérdida de asentamiento de 25 a 100 mm [Harrington y Fick, 2014]. A mayor dosis de fibra, mayor pérdida de asentamiento y mayor dificultad de trabajar la mezcla, dado que la mezcla se vuelve más rígida [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018; López, 2015]. Un ensayo de asentamiento realizado en Italia, de acuerdo con la norma ASTM C143, demostró que al utilizar un volumen de fibra de 0,5%, las fibras de acero reducen el asentamiento en un 40%, mientras que las fibras de polipropileno lo reducen en un 30%; similarmente, al utilizar un volumen de 1%, las fibras de acero reducen el asentamiento en un 60% y las fibras sintéticas en un 50% [Plizzari et al., 2018].

Para compensar la reducción de asentamiento, puede ser útil incrementar el contenido de reductores de agua, como superfluidificantes, y/o, si es necesario aumentar el contenido total de

cemento en la mezcla. Cualquiera de las dos soluciones mejora la trabajabilidad del hormigón reforzado con fibra [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

Al utilizar volúmenes mayores a 0,5%, además de afectar negativamente la trabajabilidad de la mezcla, puede ocurrir apelotonamiento. El apelotonamiento ocurre cuando no se ajusta la mezcla para acomodar la dosis de fibra, o cuando las fibras se introducen en una secuencia o velocidad inadecuada, o por múltiples factores relacionados al tipo de macrofibra seleccionada y al tipo y velocidad del mezclador. El apelotonamiento puede ser minimizado al agregar las macrofibras a la mezcla antes o simultáneamente con los agregados, contrario a agregarlas al final, o también se pueden cambiar los agregados para que tengan una forma más angular y así ayudar en la dispersión de las fibras. Se recomienda una gradación de buena calidad para conseguir un tamaño de partícula bien graduado y minimizar el apelotonamiento. En la Tabla 2.4 se muestran recomendaciones de la ACI 544 para distintas gradaciones que han mostrado reducir la formación de apelotonamiento y mejorar la trabajabilidad del hormigón reforzado con fibra [Roesler et al., 2019].

Tabla 2.4. Gradación de agregados recomendada para hormigón reforzado con fibra.

Tamaño Tamiz	Material que pasa cada uno de los siguientes tamices (%)				
	3/8 in. (10 mm)	0,5 in. (13 mm)	0,75 in. (19 mm)	1 in. (25 mm)	1,5 in. (38 mm)
2 in. (51 mm)	100	100	100	100	100
1,5 in. (38 mm)	100	100	100	100	85-100
1 in. (25 mm)	100	100	100	94-100	65-85
0,75 in. (19 mm)	100	100	94-100	76-82	58-77
0,5 in. (13 mm)	100	93-100	70-88	65-76	50-68
3/8 in. (10 mm)	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
#4 (5 mm)	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
#8 (2,4 mm)	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
#16 (1,1 mm)	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
#30 (0,6 mm)	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
#50 (0,3 mm)	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
#100 (150 μ m)	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
#200 (75 μ m)	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

Actualmente, la Dirección de Aeropuertos, utiliza en sus diseños una banda granulométrica, que divide al agregado fino del grueso (Dirección de Aeropuertos, 2016), las cuales se muestran en las Tablas 2.5 y 2.6, respectivamente.

Tabla 2.5. Granulometría del Árido Fino aplicada en la DAP.

Tamaño Tamiz	Material que pasa cada tamiz (%)
3/8 in. (9,5 mm)	100
#4 (4,75 mm)	95 – 100
#8 (2,36 mm)	80 – 100
#16 (1,18 mm)	50 – 85
#30 (0,6 mm)	25 – 60
#50 (0,3 mm)	10 – 30
#100 (0,15 mm)	2 – 10

Tabla 2.6. Granulometría del Agregado Grueso aplicada en la DAP.

Tamaño Tamiz	Material que pasa cada tamiz (%)				
	2'' – 1'' 50,8 – 25,4	1'' – #4 25,4 – 4,75	1 ½'' – ¾'' 38,1 – 19,0	¾'' – #4 19,0 – 4,75	1'' – #4 25,4 – 4,75
2,5 in. (63 mm)	100	-	-	-	-
2 in. (50,8 mm)	90 – 100	-	100	-	-
1,5 in. (38,1 mm)	35 – 70	100	90 – 100	-	100
1 in. (25,0 mm)	0 – 15	95 – 100	20 – 55	100	95 – 100
0,75 in. (19,0 mm)	-	-	0 – 15	90 – 100	-
0,5 in. (12,5 mm)	0 – 5	25 – 60	-	-	25 – 60
3/8 in. (9,5 mm)	-	-	0 – 5	20 – 55	-
#4 (4,75 mm)	-	0 – 10	-	0 – 10	0 – 10
#8 (2,36 mm)	-	0 – 5	-	0 – 5	0 – 5

Al comparar las Tablas 2.5 y 2.6 expuestas por la DAP en su Especificación Técnica General N°16, con la Tabla 2.4, presentada por el investigador Jeffery Roesler a partir de las recomendaciones de la ACI 544, se observa que la banda granulométrica de la DAP no cumple en su totalidad con la granulometría recomendada. Sin embargo, como su nombre lo indica es una recomendación, independiente de la granulometría, se deben llevar a cabo ensayos que permitan verificar una correcta aplicación de las fibras en el hormigón.

2.2.1.2 Peso

El peso de la mezcla de hormigón reforzado con fibra en fresco cambia ligeramente dependiendo del tipo de fibra y su dosis. Las macrofibras sintéticas tienen una densidad (890 – 960 kg/m³ [Herrera, 2017]) más baja que el cemento y los agregados, por lo tanto, el peso unitario del hormigón reforzado con fibra sintética es mínimamente afectado cuando se utilizan volúmenes altos de fibra. Por el contrario, las macrofibras de acero tienen una densidad mayor (7840 kg/m³ [Herrera,

2017]), y, en consecuencia, el peso unitario del hormigón aumenta en relación con el volumen de fibra de acero utilizado [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

2.2.1.3 Contenido de Aire

El contenido de aire en el hormigón puede verse afectado por la adición de fibras, principalmente por el impacto negativo de las fibras en la trabajabilidad de la mezcla, esto se puede solucionar fácilmente aumentando ligeramente el contenido de aire en el momento en que se mezclan los materiales [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018]. Sin embargo, estudios en Europa muestran que hasta un volumen de fibra de 1% para ambos tipos de fibra, sintética y de acero, el aumento en el contenido de aire es pequeño, por lo que la influencia de las fibras es despreciable en este parámetro [Plizzari et al., 2018].

2.2.1.4 Agrietamiento

Las grietas por contracción plástica se forman en la superficie del concreto fresco inmediatamente después de ser colocado y mientras permanece en estado plástico. Las grietas por contracción plástica son causadas por una rápida pérdida de agua de la superficie del hormigón antes de que este haya fraguado. Si la superficie se seca muy rápidamente, el hormigón puede permanecer plástico y las grietas no se desarrollan en ese momento, pero se formarán seguramente tan pronto como el hormigón se endurezca un poco más. La incorporación de un refuerzo de fibras sintéticas en la mezcla de hormigón puede ayudar a resistir la tensión cuando el hormigón es muy frágil [López, 2015].

En México se llevó a cabo un ensayo de contracción plástica siguiendo las recomendaciones y referencias del ACI 544. Este ensayo mostró que a medida que se incrementa la dosis de fibra, el número y los anchos de grieta en el hormigón experimentan una reducción considerable en comparación con el hormigón sin fibra. Comparando ambos tipos de fibra resulta evidente que la macrofibra de polipropileno es más eficiente para el control de grietas por contracción plástica que las macrofibras de acero [López, 2015].

2.2.2 Propiedades de Hormigón Reforzado con Fibra en Estado Endurecido

2.2.2.1 Resistencia y Módulo Elástico

Dado que las dosis de fibras para aplicaciones de recapados y pavimentos son menores a 0,5%, no se esperan cambios en la resistencia a compresión, flexión o módulo de elasticidad [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018; Plizzari et al., 2018; Herrera, 2017; López, 2015]. En algunos casos

la adición de fibras puede disminuir alguna de estas resistencias, esto por una mala dispersión de fibras, por presencia de apelsonamiento o problemas con el posicionamiento del hormigón reforzado con fibra [Roesler et al., 2019].

Algunas mezclas con altas dosis de fibras sintéticas o de acero, alrededor de un 2%, han mostrado aumentos en la resistencia del hormigón, especialmente en la resistencia a flexión, con casi un incremento de un 100% con la adición de fibras de acero en altos volúmenes. Este aumento en la resistencia está directamente relacionado con el aumento en la dosis de fibras, aumento en la relación de aspecto de la fibra y al usar fibras con textura deformada [Bentur y Mindess, 2007].

2.2.2.2 Dureza y Fractura

El impacto más significativo de las fibras en el comportamiento del hormigón es el aumento en la dureza post agrietamiento y la energía de fractura. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de una viga de hormigón reforzado con fibra sintética que ha sido cargada hasta pasar la capacidad máxima de carga del hormigón; sin embargo, se ve como la viga aún retiene carga a través de las macrofibras. Lo anterior refleja el concepto de resistencia residual [Roesler et al., 2019].



Figura 2.6. Ejemplo de post agrietamiento de una viga de HRF sometida a flexión, usando una dosis de macrofibras sintéticas de 0,43% [Roesler et al., 2019].

La dureza de un hormigón reforzado con fibra puede ser uno o dos órdenes de magnitud mayor que la de un hormigón sin fibra, la cual aumenta en función del contenido de macrofibras y su relación de aspecto. Con el fin de cuantificar el impacto de las macrofibras en la dureza y energía de absorción, se han creado medidas estándar para calcular la resistencia residual del hormigón luego del agrietamiento. La norma ASTM C1609, detallada más adelante en el ítem 2.4.2.1.1, es uno de los métodos disponibles para medir la resistencia residual del hormigón reforzado con fibra. La Tabla

2.7 muestra resultados de la norma ASTM C1609 para dos tipos de fibras sintéticas en dos dosis. Los resultados muestran que la resistencia residual aumenta con el volumen de macrofibras y es afectada por el tipo de macrofibra, obteniendo mejores resultados para la fibra sintética en relieve de 48 mm de longitud [Roesler et al., 2019].

Tabla 2.7. Resultados del ensayo a flexión de la norma ASTM C1609 para dos tipos y dosis de macrofibras sintéticas.

Característica de la fibra	Mezcla de monofilamentos de polipropileno torcidos de 54 mm y 38 mm de largo		Fibra de polipropileno en relieve de 48 mm de largo	
Volumen total de fibra	0,27%	0,38%	0,27%	0,38%
Resistencia Compresión [MPa]	54,8	52,5	53,3	53,8
Resistencia Flexión, f_1 [MPa]*	5,05	5,05	5,05	5,20
Resistencia Residual, f_{150} [MPa]*	0,65	1,05	0,90	1,55

* Ensayo realizado con una viga de 150x150 mm de sección transversal y una longitud de vano de 450 mm.

En la Tabla 2.8 se muestra el efecto del tipo de macrofibras, el volumen y la edad del hormigón en la resistencia residual [Kim y Bordelon, 2017a].

Tabla 2.8. Valores de resistencia residual del ensayo ASTM C1609 para HRF con diferentes tipos y dosis de fibras y edad de hormigón.

Tipo de fibra	Volumen de fibra	Resistencia Residual en L/150, f_{150} [MPa]*					
		3 días	7 días	14 días	28 días	56 días	90 días
Acero, extremos enganchados, 35 mm longitud, 0,55 mm diámetro.	0,5%	-	2,40	2,62	2,83	2,61	2,48
	1,0%	2,71	3,08	3,26	3,21	4,03	4,53
Acero, extremos enganchados, 60 mm longitud, 0,9 mm diámetro.	0,5%	2,71	2,99	3,45	4,18	-	4,19
	1,0%	4,06	4,60	4,61	6,51	4,77	5,26
Polipropileno, 40 mm longitud, 0,11 mm espesor, 1,4 mm ancho.	0,5%	2,22	1,64	1,97	1,10	1,79	1,25
	1,0%	2,87	3,05	4,22	2,73	3,20	2,62
Polipropileno, 50 mm longitud, 0,4 mm espesor, 1,2 mm ancho.	0,5%	1,68	2,10	1,97	2,29	3,27	2,34
	1,0%	2,99	3,00	4,39	4,49	3,68	4,26

* Ensayo realizado con una viga de 150x150 mm de sección transversal y longitud de vano de 450 mm.

En general, la resistencia residual aumenta proporcionalmente con el volumen de macrofibras, su relación de aspecto, y con el aumento en la rigidez de la fibra. La resistencia residual puede no seguir aumentando con la edad del hormigón [Roesler et al., 2019].

A continuación, en la Tabla 2.9, se muestran los efectos de diferentes tipos de macrofibras, volúmenes y edad del hormigón en la energía total de fractura. Para todos los tipos de fibras, la energía total de fractura aumenta con el aumento en la dosis de fibra y edad del hormigón. Se afirma con

certeza que las macrofibras aumentan la energía total de fractura del hormigón reforzado con fibras [Kim y Bordelon, 2017].

Tabla 2.9. Efecto del tipo y volumen de fibra y la edad del hormigón en la energía total de fractura, utilizando vigas de hormigón reforzado con fibra y sin reforzar.

Tipo de fibra	Volumen de fibra	Energía Total de Fractura [N/m]*		
		7 días	28 días	90 días
Sin Fibra	-	81	88	107
Acero, extremos enganchados, 35 mm longitud, 0,55 mm diámetro.	0,5%	728	751	1325
	1,0%	955	1046	1621
Acero, extremos enganchados, 60 mm longitud, 0,9 mm diámetro.	0,5%	425	1142	2137
	1,0%	1051	1749	2740
Polipropileno, 40 mm longitud, 0,11 mm espesor, 1,4 mm ancho.	0,5%	490	512	648
	1,0%	531	510	717
Polipropileno, 50 mm longitud, 0,4 mm espesor, 1,2 mm ancho.	0,5%	525	689	821
	1,0%	703	991	901

* Energía total de fractura hasta completar la separación del hormigón y una apertura de 2,5 mm de deflexión.

Un estudio en México llevado a cabo según las indicaciones de la ACI 544 consistió en medir la resistencia al impacto del hormigón reforzado con fibras, empleando la caída repetitiva de un peso de prueba de 4,54 kg sobre un espécimen cilíndrico de 150 mm de diámetro. Se registraron los golpes necesarios para generar la primera grieta y los golpes necesarios hasta causar la falla (grietas de extremo a extremo). Los resultados indican que, a mayor dosis de fibra, ya sea de acero o sintética, se obtiene una mayor resistencia al impacto. Esta mejora en la resistencia al impacto se traduce en un aumento en la resistencia al agrietamiento, presentando una menor tendencia a la fragmentación y al desprendimiento, lo que permite obtener un material con propiedades adecuadas para diversas aplicaciones donde se requieran estas cualidades [López, 2015].

2.2.2.3 Fatiga

En general, macrofibras de acero no tienen efecto en las propiedades de fatiga a compresión del hormigón, pero si incrementan las propiedades de fatiga a flexión mediante tamaños de grieta reducidos y aumentando la cantidad de energía absorbida antes de fallar. Ensayos a fatiga en vigas demuestran que el hormigón reforzado con fibra tiene mejores desempeños a fatiga que un hormigón sin fibra, obteniendo un número de ciclos hasta fallar significativamente mayor a los del hormigón sin fibra [Bentur y Mindess, 2007; Mulheron, 2015; Kevem et al., 2016]. Otros estudios demuestran que el hormigón reforzado con fibra sintética o de acero es capaz de retener tenacidad incluso después de 2 millones de ciclos de fatiga con y sin daño a ciclos hielo/deshielo [Roesler et al., 2019; Forgeron y Trottier, 2004].

2.2.2.4 Eficiencia de Transferencia de Carga

Pocos estudios se han dirigido en el impacto de las macrofibras en la eficiencia de transferencia de carga en juntas. Las macrofibras han demostrado controlar anchos de grietas, y por lo tanto deberían mejorar la eficiencia de transferencia de carga a través de juntas de contracción y grietas [Roesler et al., 2019]. Investigaciones dirigidas por la universidad de Pittsburgh compararon vigas de hormigón reforzado con fibras y sin fibras sometidas a cargas repetitivas de corte, similar al movimiento vertical de juntas. El estudio encontró que las vigas de hormigón reforzado con fibra con dosis de 0,36% de fibra sintética recta o 0,43% de fibra sintética rizada exhibieron un 20% de aumento en la eficiencia de transferencia de carga comparado con hormigón sin fibra, manteniendo las juntas de hormigón reforzado con fibra, la misma eficiencia de transferencia de carga por varios millones de repeticiones de carga [Barman et al., 2015; Barman, 2014]. Mediciones a escala real de eficiencia de transferencia de carga en juntas en varios hormigones sin fibra y en recapados de hormigón reforzado con fibras han mostrado que el hormigón reforzado con fibra se desempeña mejor [King y Roesler, 2014], pero aún hay datos limitados para entregar conclusiones sólidas sobre los beneficios en la eficiencia de transferencia de carga [Roesler et al., 2019].

2.2.2.5 Retracción

Tradicionalmente, las microfibras han sido aplicadas exitosamente para controlar y minimizar el agrietamiento por retracción plástica en edades tempranas del hormigón. Se ha mostrado que el agrietamiento por retracción plástica se mitiga hasta con dosis muy bajas de macrofibras de polipropileno (0,1%) [Bentur y Mindess, 2007], sin embargo, se han obtenido mejores resistencias al agrietamiento por retracción plástica cuando se utilizan microfibras en vez de macrofibras [ACI 544, 2010]. Investigaciones han encontrado que el efecto de las macrofibras en la retracción por secado ha sido algo conflictivo. Macrofibras de acero pueden reducir la retracción por secado, con mayores reducciones mientras mayor sea el volumen de fibra y cuando se utilizan fibras deformadas en vez de rectas. Fibras de acero han sido confirmadas para reducir el agrietamiento y los anchos de grieta bajo condiciones de retracción [Bentur y Mindess, 2007]. En pruebas de retracción, la adición de macrofibras de acero de un 0,5% de volumen redujo el ancho máximo de grieta hasta en un 90% y el ancho promedio de grietas en un 80% comparado con un hormigón sin fibra, mientras que al utilizar un 0,5% de volumen de macrofibras de polipropileno se reduce el ancho máximo de grieta hasta en un 70%, y el ancho promedio en un 70% [Shah et al., 1994]. La adición de macrofibras puede retrasar la formación visible de grietas, y en hormigones reforzados con fibra con volúmenes de al menos 0,5% las macrofibras pueden transferir esfuerzos a través de las grietas bajo condiciones de retracción

[Shah y Weiss, 2006]. Sin embargo, la dosis recomendada para aplicaciones de pavimentos es máximo 0,5% [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

2.2.2.6 Durabilidad

Dado que las macrofibras mantienen las grietas unidas luego de que el hormigón se ha agrietado, el hormigón reforzado con fibra tiene el potencial de mejorar la durabilidad frente a materiales perjudiciales en comparación con el hormigón sin fibra, por medio de bajas permeabilidades y reducción de anchos de grieta. Para hormigones con anchos de grieta mayores a 0,1 mm, la adición de fibra de acero ha mostrado reducir la permeabilidad del hormigón en comparación con el hormigón sin fibra agrietado [Rapoport et al., 2002].

Dependiendo de la calidad del agregado, la dureza del hormigón, y de la configuración de la prueba y velocidad de carga, las macrofibras de acero pueden aumentar significativamente la resistencia a la abrasión del hormigón [Bentur y Mindess, 2007]. Investigaciones han demostrado que las fibras sintéticas también aumentan la resistencia a la abrasión del concreto [Grdic, 2012].

Estudios sobre la durabilidad en ciclos hielo/deshielo del hormigón reforzado con fibra han mostrado que, similar al hormigón sin fibra, la cantidad de aire atrapado es un factor crítico [ACI 544, 2010], por lo que el mismo requerimiento de contenido de aire aplicado durante el diseño convencional de hormigón sin fibra debería ser aplicado para el hormigón reforzado con fibras. En un estudio, luego de 300 ciclos de hielo/deshielo, el hormigón reforzado con una dosis de 0,5% de macrofibras de acero experimentó un 15% de reducción en la resistencia a flexión, comparada con el 30% en la reducción del hormigón sin fibra [Forgeron y Trottier, 2004].

Al utilizar macrofibras de acero en el hormigón, un mecanismo de degradación potencial es la corrosión. En general, con un diseño de mezcla apropiado, el riesgo de corrosión puede ser minimizado [Roesler et al., 2019]. Respecto a la corrosión del refuerzo de acero convencional, un estudio demostró que la presencia de macrofibras sintéticas en el hormigón reforzado con acero convencional reduce la tasa de corrosión del acero embebido, expuesto a las condiciones de retracción y a soluciones de cloruro [Sanjuán et al., 1997].

2.3 Cambios en la Mezcla y Constructibilidad del Hormigón Reforzado con Fibra

2.3.1 Preparación de la Superficie

Para llevar a cabo la preparación de la superficie se deben seguir las mismas recomendaciones que para un pavimento de hormigón sin fibra, ya sea preparando la subrasante o el pavimento existente en caso de recapados, utilizando la ETG N°16 de la Dirección de Aeropuertos.

2.3.2 Proporciones de Mezcla en Hormigón Reforzado con Fibra

Generalmente no es necesario cambiar el diseño de mezcla para volúmenes de macrofibras menores a 0,5% [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018; Bentur y Mindess, 2007], pero lograr un hormigón reforzado con fibra trabajable es clave para el mezclado y dispersión de fibras, así como también para la consolidación y terminación sin apelotonamiento. En ocasiones, se necesita reducir el contenido de agua o utilizar componentes superfluidificantes para contrarrestar el impacto negativo de las macrofibras en la trabajabilidad de la mezcla, siempre fabricando lotes de prueba para evaluar si el diseño es adecuado para aplicar en pavimentos. Sin embargo, si se utilizan dosis mayores de fibras, se debe reevaluar la gradación de agregados, y el volumen y razón de gruesos/finos para asegurar una densidad adecuada de mezcla [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

El contenido total de cemento debe ser suficiente para cubrir las macrofibras y así proveer un adecuado proceso de mezclado, posicionado, consolidado y terminado. Dado que se espera una pérdida de asentamiento con la adición de fibras [Harrington y Fick, 2014], el hormigón puede ser mezclado para obtener una reducción mayor que la normal, logrando así el asentamiento deseado luego de agregar y mezclar las macrofibra. Por lo mismo, la razón de agua cemento (a/c) debe ser seleccionada para la trabajabilidad y resistencia deseada del hormigón reforzado con fibras. En general, se utiliza una razón de agua cemento de 0,38 a 0,45 y un contenido de aire de 5 a 7% para recapados y pavimentos de hormigón reforzado con fibra [Roesler et al., 2019].

En algunos casos se ha reportado la presencia de apelotonamiento de fibras, correspondiente a una aglomeración y entrelazamiento de fibras. Esto sucede cuando se tienen las siguientes condiciones: macrofibras se incorporan preagrupadas o en paquetes al mezclado, el volumen de macrofibras es muy alto, macrofibras tienen alta relación de aspecto, insuficiente cantidad de cemento, y/o el agregado grueso es muy grande. También puede ocurrir apelotonamiento cuando el mezclador tiene sus paletas desgastadas o en mal estado [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

Para minimizar el apelotonamiento y dispersar las fibras correctamente, se recomienda agregar las macrofibras en conjunto con los agregados con una adecuada supervisión, utilizar una mayor velocidad en la mezcladora, o estableciendo un mínimo de 40 revoluciones a velocidad normal [Roesler et al., 2019].

En general, se deben llevar a cabo los mismos procedimientos que se muestran en las especificaciones técnicas de la DAP para el diseño de mezcla de un hormigón reforzado con fibras que para un hormigón convencional, dado que en la ETG N°16 se contempla igualmente el uso de aditivos en la preparación del hormigón para una determinada plasticidad y trabajabilidad.

2.3.3 Posicionamiento y Consolidación

Particularmente para pavimentos de hormigón reforzado con dosis de macrofibras menores a 0,5% se utilizan prácticas convencionales de construcción, herramientas y equipos. En cuanto a la vibración del hormigón, se deben seguir los procedimientos establecidos para el hormigón sin fibra, con especial cuidado de no sobrevibrar la mezcla de hormigón reforzado con fibras, de acero o sintética, dado que las fibras podrían hundirse o flotar a la superficie. Por otro lado, si existe apelotonamiento, este debe ser retirado inmediatamente. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo de construcción de pavimento de HRF en Iowa, E.E.U.U. [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].



Figura 2.7. Ejemplo de construcción de pavimento de hormigón con fibra en Iowa.

2.3.4 Terminaciones

Para un pavimento de hormigón reforzado con fibra se utilizan los mismos equipos de terminaciones convencionales para hormigón sin fibra, ya sean flotas o perfiladores de magnesio, de radio o de bordes rectos (Figura 2.8). Es importante no utilizar flotas de madera ni inclinar las cuchillas de algún perfilador ya que podrían extraer fibras de la superficie. Las macrofibras embebidas parcialmente en el pavimento eventualmente desaparecen debido al tráfico o a agentes del medio ambiente [Roesler et al., 2019].



Figura 2.8. Flotas convencionales para utilizar en HRF. De izquierda a derecha: magnesio, radio y borde recto.

2.3.4.1 Apelotonamiento y Apariencia de la Superficie

Cuando existan apelotonamientos de fibras, éstas deben ser removidas inmediatamente con un rastrillo. El contratista debe ajustar el proceso de lotes y de mezcla para evitar la creación de aglomeraciones de fibras tan pronto como se informan en el proyecto. Si la mezcla de hormigón reforzado con fibra tiene aglomeraciones dentro, cuando éste es colocado, las aglomeraciones pueden subir a la superficie del pavimento, causando problemas en las terminaciones. La superficie terminada de un pavimento de hormigón reforzado con fibra presenta discretas fibras visibles como se observa en la Figura 2.9 [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].



Figura 2.9. Ejemplo de apariencia de superficie de un pavimento de HRF.

Esta apariencia texturizada es más común con macrofibras que tienen menor rigidez. Las macrofibras sintéticas se degradan con la exposición a la luz ultravioleta por un largo periodo de tiempo, por lo que desaparecen de la superficie. La abrasión del tráfico también ayuda a remover fibras expuestas o sueltas en la superficie. Por otro lado, históricamente se ha pensado que las macrofibras de acero pueden pinchar neumáticos si es que llegan a salir de la superficie del pavimento. Sin embargo, estas fibras se doblan en la superficie y se rompen. Por otra parte, las fibras de acero directamente expuestas al medio ambiente y al agua pueden corroerse localmente, pero el resto de las fibras internas funcionan sin ninguna corrosión aparente [Roesler et al., 2019].

2.3.4.2 Texturizado

Para otorgar fricción y textura en la superficie de un pavimento de hormigón reforzado con fibra, se debe realizar el texturizado y cepillado. Para esto, se puede utilizar un rastrillo o una capa de arpillera, con precaución de evitar algún disturbio y de remover macrofibras desde la superficie. El

cepillado debe mantener un ángulo pequeño con la horizontal para prevenir el levantamiento o exposición de fibras. El texturizado debe además realizarse solo en una dirección. En las Figuras 2.10 y 2.11 se muestran ejemplos de un buen uso de la capa de arpillera y del rastrillo, respectivamente, para darle textura al pavimento [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].



Figura 2.10. Texturizado con capa de arpillera de un pavimento de hormigón reforzado con 2,4 kg/m³ de fibra sintética.

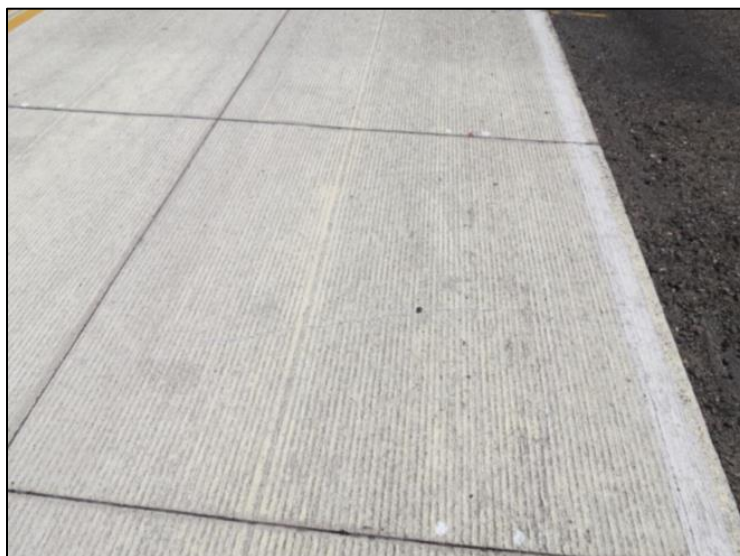


Figura 2.11. Texturizado longitudinal con rastrillo de un pavimento de hormigón reforzado con fibra sintética.

2.3.4.3 Curado

El curado es crítico en pavimentos de hormigón reforzado con fibras de pequeño espesor, ya que son más sensibles a contracciones por temperatura a edad temprana y pérdidas de humedad. Sin embargo, el curado de un hormigón reforzado con fibras debe seguir las mismas prácticas que son implementadas en el pavimento convencional [Roesler et al. 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

2.3.4.4 Juntas

Generalmente, se debe tener una sierra con anticipación para cortar las juntas, especialmente para recapados delgados. El tiempo de corte de las juntas es más crítico en hormigón reforzado con fibra que en hormigones sin fibra dado que el hormigón es más resistente al agrietamiento. Si el corte de juntas se hace muy temprano, podría ocurrir un desprendimiento de fibras o agregados. Si mientras se están cortando las juntas se observa este desprendimiento, se debe posponerse por 30 minutos. Posteriormente se debe utilizar una nueva y limpia hoja de sierra para lograr mejores cortes en los bordes y para evitar extraer fibras de la mezcla [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018].

Monitoreo a largo plazo ha mostrado que muchas juntas se activan con el tiempo, especialmente bajo cargas de tránsito. Juntas de contracción en pavimentos de hormigón reforzado con fibras deben cortarse lo antes posible. Las juntas deben cortarse primero en una sección de prueba, de 1,2 a 1,8 m de largo, para asegurar un desprendimiento aceptable [Roesler et al., 2019].

Las juntas de contracción transversales deben ser cortadas a 1/4 de profundidad del espesor del pavimento o al menos 2,5 cm, dependiendo del tipo de sierra y asumiendo que el tiempo de corte de junta es apropiado. Las juntas longitudinales deben tener un corte más profundo, aproximadamente a 1/3 de profundidad [ACI 544, 2010]. Cuando el tamaño de las losas es más pequeño, se necesitan sierras extras dado el mayor número de juntas que son requeridas. Si en losas de 1,2 o 1,6 m, se necesita un número mayor de juntas y las condiciones del tiempo (altas temperaturas y velocidades de vientos) están afectando significativamente el tiempo de corte, se recomienda que las juntas transversales se corten primero cada 7 u 11 m, y luego proceder a cortar el resto de las juntas del panel. Este proceso debe ser usado solo cuando sea absolutamente necesario [Roesler et al., 2019].

2.3.4.5 Mantención

Comúnmente no se suelen sellar las juntas de contracción en pavimentos de hormigón reforzado con fibras, pero esta práctica depende de la servicialidad del pavimento, el número de calzadas, el tamaño de las losas y otros factores ambientales. Desde que se conoce que las macrofibras mantienen las aperturas de juntas menor a 1 mm, no hay necesidad de agregar sello. Si se forma una grieta en la mitad de la losa y permanece apretada, no hay necesidad de sellar la grieta. Si se decide

remover y reemplazar la losa, las juntas existentes de la losa requerirán un corte en la totalidad de su profundidad con el fin de remover la losa dañada. Cuando una nueva mezcla de hormigón reforzado con fibra se posiciona en la losa, los beneficios de estas fibras se mantienen independientes a los de las losas adyacentes. En estos casos, se requiere una losa de reemplazo con mayor espesor para contrarrestar los altos esfuerzos esperados ésta.

Si el pavimento de hormigón reforzado con fibras eventualmente muestra un alto valor de IRI, se debe utilizar la técnica de rectificado de diamantes (Figura 2.12) para mejorar el viaje y la fricción. La presencia de macrofibras, especialmente de acero, puede requerir mayor esfuerzo para realizar el rectificado.



Figura 2.12. Técnica de rectificado de diamantes para un pavimento de hormigón.

En general, para construir un pavimento de hormigón reforzado con fibra, se deben seguir las mismas prácticas exigidas por la DAP en sus métodos de construcción expuestos en la ETG N°16, esto es, procesos, herramientas y máquinas. La diferencia está en que en la ETG no se detalla explícitamente la profundidad de corte de las juntas de contracción longitudinales, las cuales deben cortarse a un tercio de profundidad, además que se recomienda cortar las juntas en una sección de prueba, en el caso de un pavimento de hormigón reforzado con fibra.

2.4 Métodos de Prueba para Hormigón Reforzado con Fibra

Este ítem detalla solo los ensayos de hormigón reforzado con fibra que han sido usados o propuestos para aplicaciones de pavimentos o recapados. A continuación, se muestran los ensayos a realizar en estado fresco y endurecido.

2.4.1 Pruebas en Estado Fresco

Para ensayar el hormigón reforzado con fibra se utilizan las mismas pruebas y normas que el de un hormigón convencional sin fibra, estos son: Asentamiento (ASTM C143), Contenido de Aire (ASTM C173, ASTM C231) y Peso Unitario (ASTM C138) [Roesler et al., 2019; Plizzari et al., 2018; López, 2015]. La presencia de macrofibras puede complicar la rutina de ejecución de estos ensayos, sin embargo, con cuidado y precaución, un operador con experiencia puede aplicarlos satisfactoriamente. Se creó un método adicional para medir la trabajabilidad de un hormigón con fibra (ASTM C995), pero ha sido retirado sin reemplazo [Roesler et al., 2019].

El potencial de agrietamiento por retracción plástica puede ser testeado usando la norma ASTM C1579. Esta prueba compara el agrietamiento por retracción plástica de una mezcla fresca de hormigón reforzado con fibra con una de hormigón sin fibra cuando ambos son expuestos a condiciones severas de secado. Se miden los anchos de grieta luego de 24 horas, y se obtiene una razón de reducción de grieta, la cual es computarizada y se basa en la razón entre el ancho promedio de grietas de un hormigón reforzado con fibras y el de un hormigón sin fibra [Roesler et al., 2019].

2.4.2 Pruebas en Estado Endurecido

La mayoría de los ensayos de hormigón convencional en estado endurecido son aplicables a un hormigón reforzado con fibra, como, por ejemplo: Resistencia a Compresión (ASTM C39), Resistencia a Flexión (ASTM C78, ASTM C293), Resistencia a la Tracción (ASTM C496), Módulo Elástico (ASTM C469), Retracción por Secado (ASTM C157), durabilidad ciclos hielo/deshielo (ASTM C666) [Roesler et al., 2019; López, 2015]. Sin embargo, un método de prueba para medir la resistencia residual (ASTM C1609), ha sido específicamente desarrollado para hormigón reforzado con fibra [Roesler et al., 2019; Plizzari et al., 2018; Herrera, 2017; López, 2015]. Este ensayo y sus variaciones son el foco principal de esta sección.

Los operadores del ensayo deben estar conscientes del comportamiento post agrietado de un hormigón reforzado con fibra. Dado que el HRF tiene una cantidad de resistencia residual luego de que la carga máxima es alcanzada, es posible obtener lecturas erradas de carga adicional luego de la falla, particularmente con ensayos de resistencia a tracción y compresión. Se recomienda que los operadores de prueba sigan las indicaciones de las normas ASTM, pero también que pongan atención

y detengan la prueba luego de que el esfuerzo máximo es alcanzado y el espécimen se ha agrietado, incluso si el aparato de carga continúa leyendo un aumento en el esfuerzo [Roesler et al., 2019].

2.4.2.1 Resistencia Residual y Tenacidad

Este es el ensayo de hormigón reforzado con fibra más significativo para la aplicación de pavimentos o recapados. Las normas que evalúan resistencia residual y tenacidad son: ASTM C1609, ASTM C1399, EN 14651, ASTM C1550 y la prueba de Barcelona [Roesler et al., 2019; Sika, 2008]. Estas pruebas fueron desarrolladas para diferentes tipos de fibras y aplicaciones. Actualmente, el método más usado para medir la tenacidad y resistencia residual es la norma americana ASTM C1609 [Roesler et al., 2019], la cual es ensayada en tres laboratorios en Chile: Laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María, Laboratorio IDIEM de la Universidad de Chile y Laboratorio DICTUC de la Universidad Católica. A continuación, se detalla cada una de estas normas para determinar la resistencia residual.

2.4.2.1.1 Resistencia Residual por ASTM C1609

La norma ASTM C1609, “Método de Prueba Estándar a Flexión de Hormigón Reforzado con Fibras”, utiliza una viga, de hormigón reforzado con fibra, resistente a la flexión y una configuración de prueba similar a la norma ASTM C78. La viga de ensayo es cargada en sus tercios y tiene un dispositivo de lectura de deflexiones ubicado a la mitad del vano (Figura 2.13), ya sea en la parte superior o en el medio. Este dispositivo se llama transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) [Roesler et al., 2019].



Figura 2.13. Configuración del ensayo ASTM C1609, mostrando el transductor LVDT en la parte superior de la mitad del vano de la viga.

La norma permite una sección transversal cuadrada de 100 mm o de 150 mm de lado. Se ha mostrado que el ensayo puede producir diferentes resistencias residuales para especímenes hechos de 100 o de 150 mm fabricados con el mismo material, sin importar si se utiliza fibra de acero o sintética [Altoubat et al., 2004]. Por lo tanto, para recapados y pavimentos de hormigón reforzado con fibra se recomienda la sección transversal cuadrada de 150 mm de lado [Roesler et al., 2019]. La Figura 2.14 muestra la geometría típica de la viga de HRF de la norma ASTM 1609, con (b) el ancho de la sección transversal, (d) la altura de la sección transversal y (L) la longitud de vano de la viga. La geometría nominal usada es $b = d = L/3$. El ensayo es dirigido hasta que la viga en su punto medio alcanza una deflexión de $L/150$, es decir, 3 mm para una viga de 450 mm de largo.

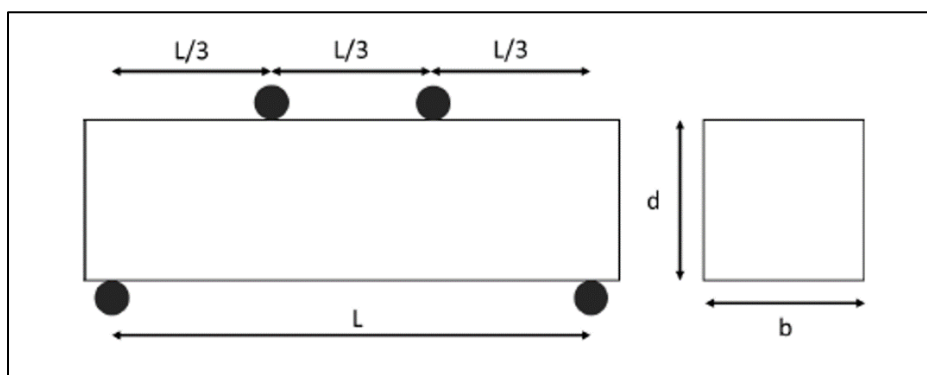


Figura 2.14. Geometría de la viga a utilizar en ASTM C1609.

El ensayo es controlado por la deflexión vertical de la viga medida con el dispositivo LVDT en la mitad del vano, con el fin de obtener la respuesta carga – deformación post peak. En la Figura 2.15 se muestra una respuesta típica del hormigón reforzado con fibras sometido al ensayo ASTM C1609 [Roesler et al., 2019].

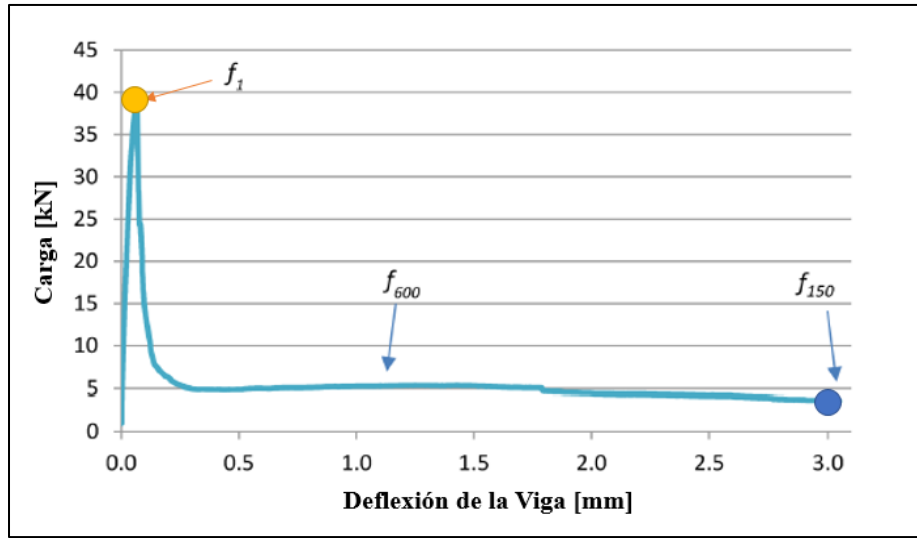


Figura 2.15. Respuesta Carga – Deflexión de un ensayo ASTM C1609, utilizando una dosis de macrofibras sintéticas de 0,27%.

La sección transversal nominal de la viga de ensayo cuya respuesta está mostrada en la Figura 2.15 es de 150 mm de lado con un largo de vano de $L = 450$ mm. En la figura también se muestra un peak de carga máxima, cercano a 40 kN, donde el hormigón alcanza su resistencia a flexión o módulo de ruptura (MOR), f_1 , la cual tiene un valor de 4,85 MPa. Por otra parte, con la carga aplicada en el momento en que el punto medio de la viga alcanza deflexiones de $L/600$ y $L/150$, es decir, 0,75 mm y 3 mm respectivamente, es posible determinar las resistencias residuales f_{600} y f_{150} respectivamente, las cuales representan la resistencia extra que tiene el hormigón luego de agrietarse dada la adición de las fibras en la mezcla. Las resistencias residuales de la Figura 2.15, f_{600} y f_{150} corresponden a 0,65 MPa y 0,45 MPa respectivamente [Roesler et al., 2019].

La Ecuación 2.1 es usada para calcular la resistencia a flexión o módulo de ruptura al momento de la carga máxima, donde toma lugar la primera grieta.

$$f_1 = \frac{P_1 \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (2.1)$$

Donde f_1 es la resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibra, P_1 corresponde a la carga máxima de la respuesta carga – deflexión del ensayo ASTM C1609, L el largo del vano de la viga, b el ancho de la sección transversal de la viga y d la altura de la sección transversal.

Las resistencias residuales, f_{600} y f_{150} , se calculan con las Ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente.

$$f_{600} = \frac{P_{600} \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (2.2)$$

$$f_{150} = \frac{P_{150} \cdot L}{b \cdot d^2} \quad (2.3)$$

Donde f_{600} corresponde a la resistencia residual en el momento que se alcanza una carga P_{600} asociada a una deflexión de la mitad del vano de la viga de $L/600$. Mientras que f_{150} es la resistencia residual en el momento que se alcanza una carga P_{150} asociada a una deflexión de la mitad del vano de la viga de $L/150$. Siendo la resistencia residual f_{150} la utilizada en los diseños de recapados o pavimentos de hormigón con fibra [Roesler et al., 2019; Roesler y Bordelon, 2018; Barman y Hansen, 2018].

Algunos valores de resistencia residual en aplicaciones de pavimentos y recapados varían desde 0,69 MPa a 1,55 MPa. El valor específico de la resistencia residual puede variar dependiendo del nivel de tráfico, condición actual del pavimento, la vida útil deseada, la geometría de la losa, las restricciones de espesor de la losa y los requisitos para controlar el ancho de la grieta. Si bien f_{150} se especifica para el diseño de un proyecto en particular, los diferentes tipos de macrofibra requieren diferentes niveles de dosificación para lograr el mismo valor de f_{150} . La geometría de la macrofibra, su rigidez, textura y otras características, junto con la resistencia del hormigón, afectan el valor de la resistencia residual [Roesler et al., 2019].

La razón de resistencia residual, R_{150} , determinada por la norma ASTM C1609, se calcula, ya sea con la Ecuación 2.4 o 2.5. Esta razón representa la resistencia residual relativa del hormigón reforzado con fibra respecto al hormigón sin fibra.

$$R_{150} = \frac{150 \cdot T_{150}}{f_1 b d^2} \quad (2.4)$$

$$R_{150} = \frac{100 \cdot f_{150}}{f_1} \quad (2.5)$$

Donde T_{150} corresponde al área bajo la curva de la respuesta carga – deflexión, hasta una deflexión de $L/150$, es decir, corresponde a la tenacidad del hormigón, f_{150} es la resistencia residual a la misma deflexión y f_1 la resistencia a flexión del hormigón o el módulo de ruptura.

R_{150} fue inicialmente el parámetro usado en el diseño de pavimentos de hormigón con fibra, pero con el tiempo se reemplazó por la resistencia residual, f_{150} , para el mismo propósito.

Actualmente, la norma ASTM C1609 es el ensayo más utilizado para evaluar la resistencia residual del hormigón reforzado con fibra y así poder facilitar el diseño de aplicaciones como pavimentos o recapados. Sin embargo, se ha reportado un problema común con esta prueba, y es que la respuesta carga – deformación post peak puede no ser obtenida debido a propagaciones de grietas repentinas que ocurren cerca de la carga peak, lo que dificulta el control en muchos tipos de máquinas

de prueba. Frecuentemente esto sucede cuando se realiza la prueba a las tasas de desplazamiento recomendadas por la ASTM. Para superar estas complicaciones, algunas soluciones planteadas han sido realizar la prueba a una razón de carga más lenta que la especificada en la norma [Banthia e Islam, 2013], reconfigurar el método de control y los aparatos de prueba [Bernard, 2009], utilizar rodillos de pasadas ilimitadas [Bernard, 2014], los cuales están especificados ahora en la norma ASTM C1812; agregar un corte en la parte inferior de la viga (Ítem 2.4.2.1.3); o probar la viga a edades más tempranas del hormigón [Roesler et al., 2019].

2.4.2.1.2 Resistencia Residual por ASTM C1399

La norma ASTM C1399, “Método de Prueba Estándar para Obtener un Promedio de Resistencia Residual para Hormigón Reforzado con Fibra”, estima la resistencia residual de una viga de hormigón reforzado con fibra usando un plato de acero debajo de la viga simplemente apoyada, como se muestra en la Figura 2.16, donde además se muestran las proporciones del espécimen, siendo (b) el ancho de la sección transversal, (d) la altura de la sección transversal y (L) la longitud de vano de la viga. La geometría nominal usada es $b = d = L/3$. Para este ensayo se fijan los valores en $b = d = 100 \text{ mm}$ y $L = 300 \text{ mm}$.

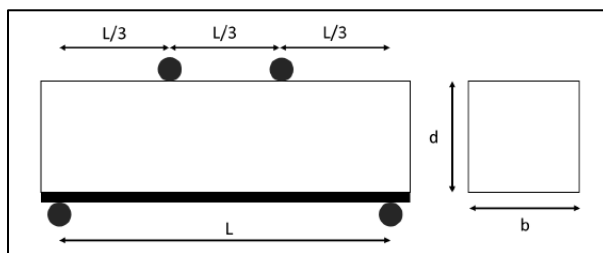


Figura 2.16. Geometría de la viga a utilizar en el ensayo de la norma ASTM 1399, utilizando un plato de acero de 12 mm de espesor.

El plato de acero se posiciona bajo la viga con el fin de lograr un inicio de grieta más estable y que no se cree una propagación de grietas repentina cerca de la carga máxima. Luego de que el peak de carga es alcanzado, el plato de acero es removido y la viga se vuelve a cargar para obtener la curva Carga – Deflexión (Figura 2.17) y así determinar la resistencia residual del hormigón reforzado con fibra.

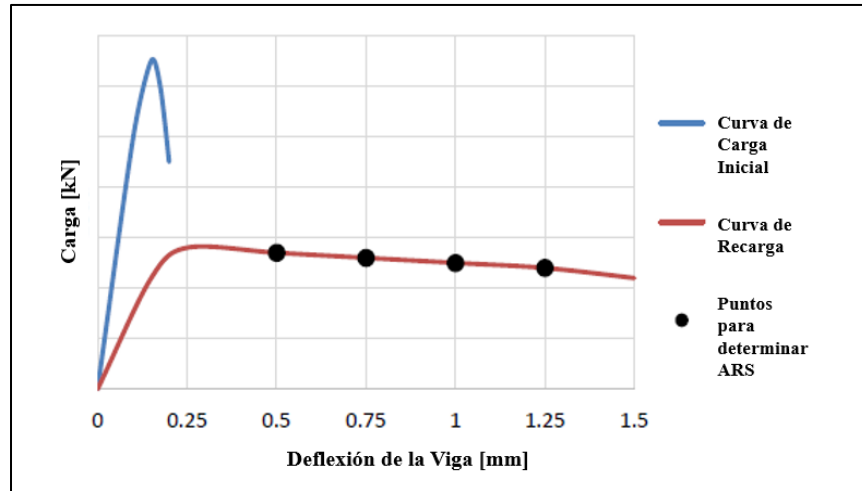


Figura 2.17. Ejemplo esquemático de respuesta carga – deflexión para la prueba ASTM C1399.

Debido a que se utiliza un plato de acero, la carga peak y la resistencia calculada obtenida de esta configuración no son equivalentes con la resistencia a flexión de la norma ASTM C78.

Durante la ejecución de la prueba ASTM C1399, se fija un dispositivo LVDT similar al de ASTM C1609. La prueba es operada controlando la carga y no el desplazamiento. El plato de espesor 12 mm se ubica debajo de la viga de HRF y la viga compuesta (con el plato) se carga hasta que se alcance el peak de carga, y la viga se agriete, y al mismo tiempo se alcance una deflexión de 0,2 mm en la viga. Luego la viga es descargada, el plato removido y la viga se vuelve a cargar hasta que alcance una deflexión vertical de 1,25 mm.

La resistencia residual promedio (ARS) es calculada usando la ecuación (2.6). Notar que la resistencia residual obtenida en ASTM C1399 no es la misma que la derivada desde ASTM C1609, incluso para la misma mezcla de hormigón y contenido de fibra.

$$ARS = \frac{F_{avg}L}{bd^2} \quad (2.6)$$

Donde ARS es la resistencia residual promedio, L el largo entre apoyos de la viga, b el ancho de la sección transversal de la viga, d la altura de la sección transversal, y F_{avg} es la carga residual promedio, calculada usando la Ecuación 2.7.

$$F_{avg} = \frac{F_A + F_B + F_C + F_D}{4} \quad (2.7)$$

Donde, F_A , F_B , F_C , F_D , corresponden a las cargas cuando la viga alcanza las deflexiones de 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm y 1,25 mm, respectivamente, durante la prueba de recarga.

2.4.2.1.3 Resistencia Residual por EN 14651

La norma EN 14651, “Método de Prueba para Medir la Resistencia a Flexión del Hormigón Reforzado con Fibra Metálica”, es un ensayo europeo de resistencia residual. La prueba es similar a la ASTM C1609, excepto que la viga se carga en un solo punto y tiene un corte en la parte inferior, como se muestra en la Figura 2.18.

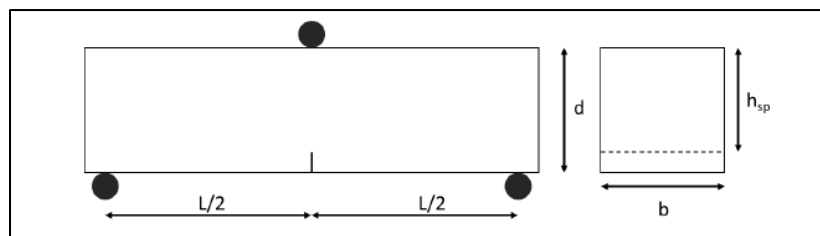


Figura 2.18. Geometría de la viga de EN 14651.

Aunque el título de la norma indica su uso para fibras metálicas, la prueba ha sido aplicada para todos los tipos de fibra [Roesler et al., 2019]. La geometría nominal de la viga es $L = 500$ mm, $b = d = 150$ mm, el corte debajo de la viga puede tener un ancho hasta 5 mm y una altura de 25 mm, por lo que $h_{sp} = 125$ mm. Se necesita un dispositivo similar a LVDT para controlar deflexiones o un dispositivo CMOD para controlar aperturas de grieta (Figura 2.19).



Figura 2.19. Configuración de la norma EN 14651, a la izquierda con un dispositivo de control de deflexiones LVDT, y a la derecha con un dispositivo de control de aperturas de grietas CMOD.

Dependiendo de la configuración utilizada (ya sea con dispositivo LVDT o CMOD), la prueba entrega curvas de carga – deflexión o carga – CMOD. En la Figura 2.20 se muestra una curva típica utilizando CMOD. Dado que la geometría de la viga incluye un corte, el comportamiento de agrietamiento alrededor de la carga peak es más estable cuando se compara con especímenes sin apertura como los de ASTM C1609 [Roesler et al., 2019; Plizzari et al., 2018].

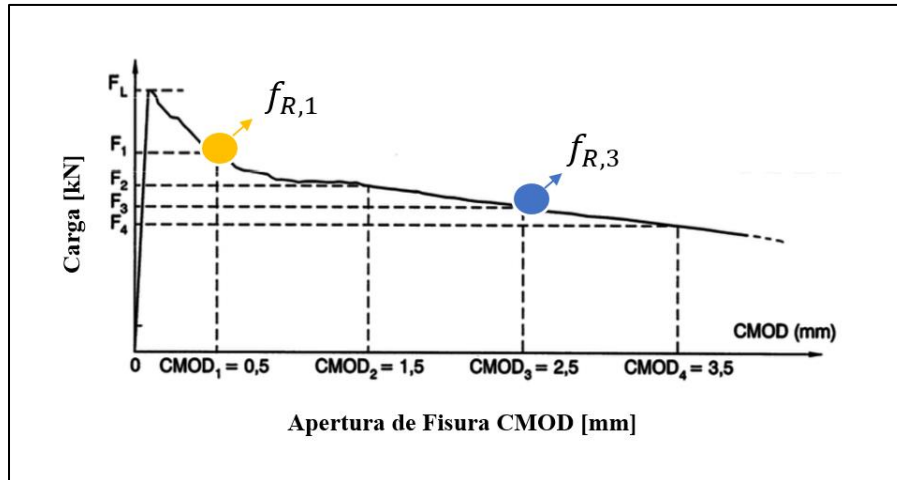


Figura 2.20. Respuesta Carga – CMOD para el ensayo EN 14651.

La resistencia residual se calcula según la Ecuación 2.8,

$$f_{R,j} = \frac{3F_j L}{2bh_{sp}^2} \quad (2.8)$$

Donde $f_{R,j}$ corresponde a la resistencia residual asociada a la carga F_j , que es la carga correspondiente al momento en que el dispositivo CMOD marca 0,5 mm ($j=1$), 1,5 mm ($j=2$), 2,5 mm ($j=3$), y 3,5 mm ($j=4$), respectivamente y h_{sp} es la profundidad de la viga menos la altura del corte. Cabe destacar que de las cuatro resistencias residuales que se calculan, $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$ son las que están asociadas a los momentos de Estado Límite Servicio y Estado Ultimo de Servicio, respectivamente.

Finalmente es importante mencionar que la resistencia residual obtenida desde EN 14651 no es la misma que la obtenida desde ASTM C1609 o ASTM C1399.

2.4.2.1.4 Tenacidad por ASTM C1550

La norma ASTM C1550, “Método de Prueba Estándar a Flexión para Hormigón Reforzado con Fibras usando un Panel Redondo”, cuantifica la tenacidad del hormigón reforzado con fibra usando un panel redondo en lugar de una viga, como se observa en la Figura 2.21.



Figura 2.21. Configuración de la prueba ASTM C 1550 de panel redondo y su modo de falla.

La prueba consiste en cargar en el centro un panel redondo de 800 mm de diámetro y 75 mm de espesor. Este panel es sujetado por tres pivotes igualmente espaciados a 25 mm del borde. El espécimen es cargado a una tasa fija de carga hasta una deformación de 45 mm. La energía absorbida se calcula como el área bajo la curva Carga – Deflexión, hasta alcanzar deflexiones de 5 mm, 10 mm, 20 mm y 40 mm. Para que la prueba resulte válida, se deben formar al menos 3 grietas radiales durante la prueba.

La norma ASTM C1550 es una prueba comúnmente utilizada para aplicaciones de hormigón lanzado o shotcrete. Para estas aplicaciones se ha mostrado que los resultados obtenidos desde ensayos que utilizan vigas pueden ser correlacionados con los resultados obtenidos desde el panel redondo, sin embargo, el uso del espécimen redondo es más confiable y de menor variabilidad [Roesler et al., 2019; Bernard 2002].

2.4.2.1.5 Tenacidad por Método de Barcelona (Doble Presión)

La prueba doblemente presionada, conocida como Prueba de Barcelona, mide la tenacidad usando cilindros o cubos de hormigón reforzado con fibras [Pujadas, 2014; Galeote, 2017]. La prueba está detallada en la norma española UNE 83515, “Hormigón Reforzado con Fibra – Determinación de Resistencia al Agrietamiento, Ductilidad y Resistencia Residual – Prueba de Barcelona”. En esta configuración, un cilindro de 150 mm de diámetro o un cubo de 150 mm de lado de hormigón reforzado con fibra es cargado por las caras superior e inferior con punzones redondos y de acero de 37,5 mm de diámetro. Cuando se utiliza el espécimen cilíndrico, se posiciona un extensómetro circunferencial a la mitad de la altura del cilindro para medir el desplazamiento total circunferencial (TCOD) (Figura 2.22) [Roesler et al., 2019].



Figura 2.22. Configuración de la Prueba de Barcelona de Doble Punción, utilizando un extensómetro circunferencial para medir su desplazamiento total.

Como una simplificación, la prueba puede realizarse midiendo el desplazamiento axial por medio del cabezal de carga y luego correlacionar este valor para obtener el desplazamiento radial (TCOD) [Pujadas, 2013]. La tenacidad o energía absorbida es inferida desde el área bajo la curva Carga – TCOD hasta un valor dado de TCOD, que puede ser 1 mm, 2 mm, 3 mm o 4 mm. A pesar de que la tenacidad calculada en esta prueba no es la misma que la calculada desde un ensayo con una viga, se puede determinar una correlación entre ambos resultados de ambas configuraciones [Roesler et al., 2019; Molins et al., 2009].

2.5 Metodología de Diseño de Pavimentos y Recapados de HRF

Dado que la adición de fibras a las losas de hormigón puede aumentar las capacidades última y a flexión de las losas, se necesita conocer la resistencia residual, f_{150} (explicada en el Ítem 2.4.2.1.1) del hormigón con fibra para cuantificar los beneficios que las macrofibras proveen a las losas. Está demostrado que la resistencia a flexión, f_1 , o módulo de ruptura de una losa muestra valores similares entre hormigón sin fibra y reforzado con fibra, sin embargo, la resistencia residual de la viga reforzada con fibra ha mostrado ser una propiedad representativa del material que describe los efectos de las macrofibras en el comportamiento de las losas de hormigón [Roesler et al., 2019; Altoubat et al., 2008].

Para diseñar recapados o pavimentos de hormigón reforzado con macrofibras, se ha propuesto una resistencia a flexión efectiva, f_{eff} , basada en las mediciones desde la ASTM C1609. Esta resistencia a flexión efectiva se utiliza como dato de entrada en programas de diseño de pavimentos, reemplazando a la resistencia a flexión estándar o módulo de ruptura del hormigón [Roesler et al., 2019; Roesler, 2019; Roesler y Bordelon, 2018; Altoubat et al., 2008; Roesler et al., 2008; Covarrubias et al., 2010; Bordelon y Roesler, 2012].

La resistencia a flexión efectiva se calcula utilizando la Ecuación 2.9.

$$f_{eff} = f_1 + f_{150} \quad (2.9)$$

Donde f_{eff} es la resistencia a flexión efectiva, f_1 corresponde a la resistencia a flexión actual del hormigón, determinada por ASTM C78 y f_{150} la resistencia residual extraída desde el ensayo ASTM C1609.

En publicaciones y métodos anteriores, se utilizaba la razón de resistencia residual, R_{150} (Ecuación 2.5), para diseñar pavimentos, pero fue reemplazada por la resistencia residual, f_{150} , para estos efectos. Esto debido a que la resistencia a flexión del hormigón, f_1 , aumenta su valor con la edad, por lo tanto, la razón de resistencia residual, R_{150} , en ocasiones puede decrecer incluso para una cantidad de fibra adecuada y una resistencia residual, f_{150} , consistente. Además, la resistencia

residual es usada porque refleja la efectividad del reforzamiento con macrofibras una vez que el hormigón se ha agrietado [Roesler et al., 2019].

Para los volúmenes de macrofibras utilizados para recapados y pavimentos de hormigón reforzado con fibra, se ha recomendado una tasa de resistencia residual, R_{150} , mínima de un 20% [Bordelon y Roesler, 2012], lo cual corresponde a valores mínimos de resistencia residual, f_{150} , entre 0,7 y 1,0 MPa [Roesler et al., 2019].

Existen varios procedimientos de diseño y softwares disponibles para recapados, ya sea adheridos o no a la capa inferior, estos se detallan en el Anexo A. En algunos de estos softwares, la opción de usar refuerzo con fibra puede estar directamente incluida en ellos, aunque solo permiten el ingreso de datos como el tipo de material de la fibra, no así sus distintas características. En los métodos en que no se incluye directamente la opción de utilizar fibras, se debe emplear la resistencia a flexión efectiva para tomar en cuenta el impacto de las macrofibras en el comportamiento de las losas de hormigón [Roesler et al., 2019].

Al diseñar un pavimento con una resistencia a flexión efectiva, se está diseñando con un valor numérico mayor que al diseñar con la resistencia a flexión o módulo de ruptura, esto le entrega una mayor capacidad última al pavimento, mayor resistencia y tenacidad y, por lo tanto, mayor vida útil si es que se mantiene el mismo espesor del pavimento diseñado sin fibra. Sin embargo, si se mantiene la vida útil del pavimento sin fibra, al incorporar las fibras a la mezcla, es posible lograr una reducción en el espesor de éste. En la Figura 2.23 se muestra un ejemplo de diseño para pavimentos para distintos tamaños de losas, para hormigón sin fibra y reforzado y para distintos niveles de tráfico en términos de Ejes Equivalentes [Roesler et al., 2019].

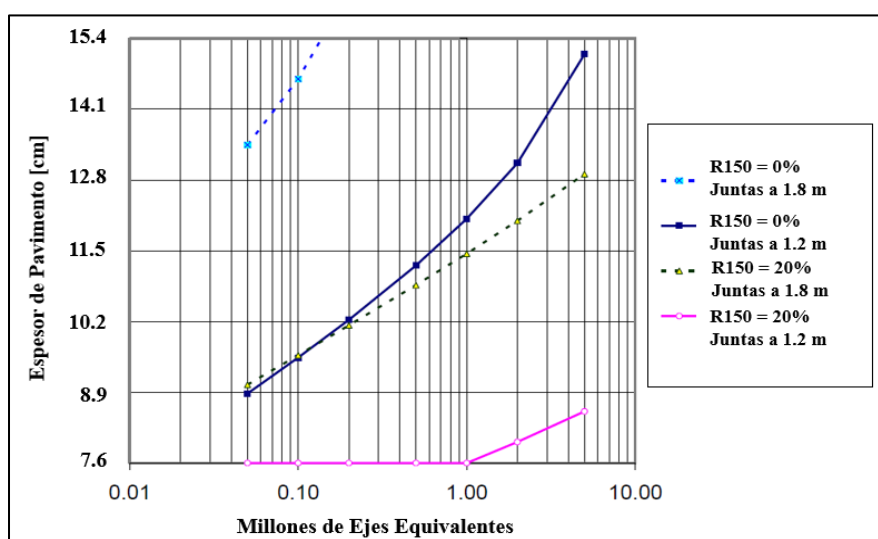


Figura 2.23. Ejemplo de diseño basado en ejes equivalentes para HRF ($R_{150} = 20\%$ o $f_{150} = 1$ [MPa]) y hormigón sin fibras con dos tamaños de losas (1.8 m y 1.2 m).

El diseño mostrado en la figura anterior demuestra que una losa más delgada para un volumen de tráfico fijo puede lograrse mediante el uso de hormigón reforzado con fibras o utilizando un tamaño menor de losa.

A continuación, se muestra una nueva herramienta de software, llamada “Estimador de Resistencia Residual para Hormigón Reforzado con Fibras”, desarrollada por el Dr. Jeffery Roesler y la Dra. Amanda Bordelon en el año 2019, para ayudar al Ingeniero Civil a seleccionar una correcta resistencia residual y resistencia a flexión efectiva para ser usados en los softwares de diseño de recapados convencionales que no incorporan el beneficio de las macrofibras.

El Estimador de Resistencia Residual (ERR) es un software basado en Excel. No diseña el espesor del pavimento, más bien provee un valor estimado de resistencia residual y resistencia a flexión efectiva basada en los datos de entrada del diseño del pavimento. Desde que algunos softwares incluyeron la incorporación de las fibras en el diseño de recapados de hormigón, como Optipave, se debe tener precaución y asegurarse que los beneficios de las fibras no están doblemente incorporados en el diseño mediante el uso de la resistencia a flexión efectiva [Roesler et al., 2019]. En la Figura 2.24 se muestra una vista de este software.

Residual Strength Estimator for Fiber-Reinforced Concrete Overlays

Instructions: Run an overlay design software to determine the design inputs. Select design choices from the drop-down menus below to narrow down the recommended performance requirement of FRC for the proposed overlay pavement. Determine the effective flexural strength to input into overlay design software instead of design concrete flexural strength. Prepare specifications to achieve design residual strength of FRC material.

Design Input Choices

Type of Overlay Road Local Road/Street

Millions of ESALS in Design Life 0.01 to 5.0 million ESALS

Asphalt Pre-Condition* Fair *refer to Tech Report to example estimates of asphalt pre-condition

Desired New Concrete Thickness 3 to 4.5 inch PCC thickness

Remaining HMA Thickness after Milling 4.5 to 6 inches HMA remaining

Overlay Slab Size 6ft joint spacing

Desired Performance Enhancements basic FRC overlay
(this will generate a higher residual strength, but not included in effective flexural strength)

Plain Unreinforced Concrete Flexural Strength (MOR) 600 psi
based on 28 day Four Point Bending (ASTM C78 or ASTM C1609)

Design Suggestions/Warnings:

Recommended Residual Strength (f_{150})

Use value within this range for the Material Specification: 100 to 150 psi (target value from ASTM C1609 test results of FRC)

Effective Flexural Strength (f_{ef})

Replace the MOR from the Pavement Design Software with this value: 700 psi

NOTE: Actual fiber dosage rates are dependent on fiber type, fiber dimensions, concrete mixing/placement technique, cement content and fiber content or volume fraction. The intended fiber and dosage rate should be verified by ASTM C1609 test method. These recommended values are based off of previous field and laboratory testing of fibers used in concrete overlay pavements. Refer to the Tech Guide or Tech Report for more details.

Developed by Amanda Bordelon, Ph.D., P.E. and Jeffery Roesler, Ph.D., P.E.
Version 1.1, April 19 2019

Figura 2.24. Vista del software “ERR” para un diseño de calle local.

En la Figura 2.24 se muestran los datos de entrada requeridos de un caso de diseño de recapado para calle local, diseñando para ejes equivalentes de 0,01 a 5 millones, condición aceptable del pavimento existente, nuevo espesor de recapado de 3 – 4,5 in (7 a 11 cm), espesor de Mezcla Asfáltica Caliente remanente de 4,5 – 6 in (11 a 15 cm) y un tamaño de losa de 6 pies (1,8 m). El software ha calculado un rango de resistencia residual entre 100 y 150 psi (0,7 a 1 MPa). Por lo tanto, si la resistencia a flexión del hormigón es de 600 psi (4,1 MPa), la resistencia a flexión efectiva con la que se debe diseñar es de 700 psi (4,8 MPa).

El Dr. Jeffery Roesler entrega un ejemplo donde se utiliza el Estimador de Resistencia Residual. Este ejemplo representa un recapado para una calle local con aproximadamente 4 millones de ejes equivalentes. El asfalto existente contiene baches y otros problemas moderados, por lo que resultará en 3 in (7 cm) de asfalto remanente. El nuevo recapado tendrá un espesor deseado entre 4,5 a 6 in (11 a 15 cm) y un espaciamiento de losas de 6 ft (1,8 m). La resistencia a flexión del hormigón es de 600 psi (4,1 MPa). Cuando se introducen estos datos de entrada al programa empírico mecanicista BCOA (con opción sin fibra), éste entrega un espesor de diseño de 5,75 in (14,6 cm). Usando los mismos datos de entrada en el estimador de resistencia residual, éste entrega un rango de resistencia residual de 150 a 225 psi (1 a 1,5 MPa) y una resistencia a flexión efectiva de 725 psi (5 MPa). El software advierte de que el asfalto debe repararse primero. Al diseñar nuevamente el espesor del recapado en el programa BCOA utilizando una resistencia a flexión de 725 psi (5 MPa) se obtiene un nuevo espesor de diseño de 4,5 in (11,4 cm), lo que se traduce en 3 cm menos del diseño sin fibra.

Cabe destacar que el Estimador de Resistencia Residual podría ser utilizado solo en casos de recapados, dado el espesor de pavimento que permite ingresar y a que no es posible dejar en cero el espesor de la capa inferior remanente. De igual forma, para diseñar un pavimento, en aeropuertos específicamente, no se utilizan los ejes equivalentes, más bien se utiliza un programa donde se ingresa como dato de entrada la flota de aeronaves y el número de operaciones, por lo que no se utilizaría el Estimador de Resistencia Residual para estos casos.

Obtenido el valor de resistencia a flexión efectiva se diseña el espesor del recapado o pavimento con un programa empírico mecanicista y se procede a seleccionar potenciales tipos de fibras y dosis que logren la resistencia residual determinada con anterioridad. Esta selección de fibras se basa en datos experimentales o por lo que diga el fabricante. Con la macrofibra seleccionada se diseña la mezcla de hormigón con macrofibras y se lanzan lotes de prueba para cada tipo de fibra en al menos dos dosis, por ejemplo 0,25% o 0,5% del volumen de mezcla. Luego se debe realizar el ensayo ASTM C1609 a una edad fija para los lotes y así determinar la resistencia residual y a flexión efectiva. Con todo lo anterior se fija el volumen (%) o contenido de fibra (kg/m^3) para la resistencia especificada.

Finalmente, durante la construcción, se debe verificar que el tipo y dosis de macrofibra seleccionada logren la resistencia in situ [Roesler et al., 2019].

Finalmente, en Latinoamérica se desarrolló la empresa chilena TCPavements, la cual fue formada en el año 2007, dada la necesidad de desarrollar, comercializar y licenciar un invento revolucionario en el concepto mundial del diseño para la construcción de pavimentos de hormigón. Su metodología de diseño radica en reemplazar las losas de pavimentación tradicional (AASHTO) por un sistema de losas de geometría optimizada, que permite una distribución más eficiente de la carga y evitar problemas de agrietamiento. Esta metodología de diseño enfatiza en que el tamaño de las losas no debe admitir más de un set de ruedas de camión a la vez, así se logra reducir espesores de losa entre 4 a 10 cm logrando optimizar recursos hasta en un 30%. La empresa principalmente trabaja con pavimentos ultradelgados de hormigón que se colocan directamente sobre el terreno, sin base, donde la subrasante tiene alto nivel de compactación. TCPavements diseña este tipo de soluciones en el software OptiPave 2.0, el cual calibró a partir de cinco secciones de prueba en distintos lugares: Universidad de Illinois, Altos de Lampa, Clínica de la U. de los Andes, El Trebal, Planta de Cementos CBB [TCPavements, s.f.].

2.6 Ensayos Realizados en Laboratorio y Escala Real

En este ítem se presentan algunos ensayos realizados en laboratorio a escala reducida, a gran escala y ensayos realizados a escala real en terreno.

2.6.1 Ensayos en Laboratorio a Escala Reducida

2.6.1.1 Ensayo Viga de Hormigón Reforzado con Fibras mediante ASTM C1609 en E.E.U.U.

El profesor Jeffery Roesler ejecutó la prueba ASTM C1609 (Ítem 2.4.2.1.1) en laboratorio, para determinar la tenacidad y la resistencia residual de 5 tipos de mezclas de hormigón reforzado con distintas macrofibra, las cuales se detallan a continuación:

- Mezcla 1: Sin fibra.
- Mezcla 2: Dosis de 0,35% de macrofibra de acero con extremo enganchado.
- Mezcla 3: Dosis de 0,50% de fibra de acero rizada.
- Mezcla 4: Dosis de 0,32% de fibra sintética recta.
- Mezcla 5: Dosis de 0,48% de fibra sintética recta.

En la Figura 2.25 y Tabla 2.10 se muestran los resultados obtenidos.

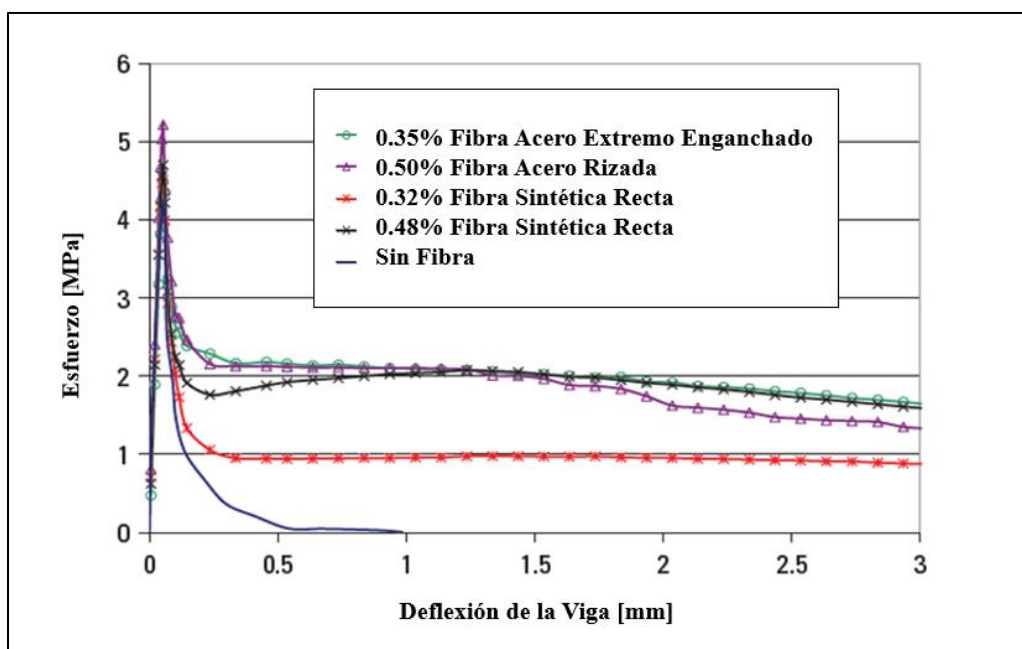


Figura 2.25. Curvas de respuesta de Esfuerzo – Deflexión para distintas mezclas en un espécimen de 150x150x450 mm.

Tabla 2.10. Valores de resistencia a flexión, resistencia residual y razón de resistencia residual para las 5 mezclas ensayadas.

Dosis y Tipo de Fibra	f_1 (MOR) [MPa]	f_{150} [MPa]	R_{150} (%)
Sin fibra	4,73	0,0	0,0
0,32% sintético	4,69	0,87	18,0
0,48% sintético	4,82	1,55	32,0
0,35% acero enganchado	4,68	1,61	34,5
0,50% acero rizado	5,28	1,27	24,0

* De acuerdo a la norma ASTM C1609.

De la Figura 2.25 y Tabla 2.10 es posible notar como la adición de fibras aumenta la tenacidad del hormigón (área bajo la curva). La mezcla que tiene mayor valor de resistencia residual es la muestra que contiene un 0,35% de fibra de acero con extremo enganchado, es decir esta muestra tiene una mayor capacidad de soportar esfuerzos a una misma deformación que el resto, esto se debe a la forma que tiene la fibra ya que tiende a adherirse mejor al tener los extremos enganchados [Roesler et al., 2019].

El fabricante puede proveer una dosis de fibra sugerida para conocer el valor específico de f_{150} . Sin embargo, se deben ensayar lotes de prueba en laboratorio con varios tipos y dosis de fibras para determinar los niveles de dosis para cada tipo, ya que los constituyentes del hormigón y sus proporciones pueden impactar en los valores de resistencia residual. El tipo y volumen de macrofibras se puede ajustar dependiendo del requerimiento de resistencia residual. [Roesler et al., 2019].

2.6.1.2 Ensayo Viga de Hormigón Reforzado con Fibras mediante ASTM C1609 en Latinoamérica.

Por otro lado, en el año 2015 en Latinoamérica, Jorge López también realizó el ensayo ASTM C1609 en laboratorio, utilizando dos tipos de fibras, de acero y polipropileno, detallados en la Tabla 2.11 y mostrados en la Figura 2.26.

Tabla 2.11. Tipos de fibras utilizadas en el ensayo ASTM C1609.

Tipo de fibra	Longitud [mm]	Diámetro [mm]	Relación de Aspecto (L/d)
Fibra corta de Acero de Extremos Enganchados	35,5	0,55	64,5
Macrofibra de Polipropileno Rizada	53,1	0,96	55,3

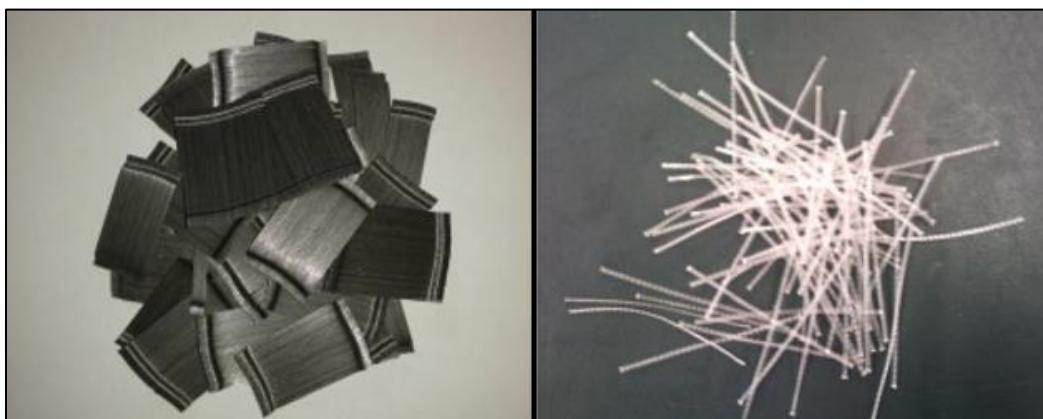


Figura 2.26. Tipos de fibras utilizadas en el ensayo ASTM C1609. A la izquierda se encuentra la macrofibra de Acero y a la derecha la de Polipropileno.

El ensayo realizado consta de ocho mezclas con diferentes dosis, de las cuales tres contienen fibra de acero y otras cuatro macrofibras de polipropileno. En la Tabla 2.12 se detallan las dosis de cada mezcla.

Tabla 2.12. Contenido de fibra en cada mezcla realizada.

Tipo de fibra	Mezcla	Contenido [kg/m ³]	Volumen [%]
Sin fibra	M1	0	0,00
Fibra corta de acero	M2	40	0,51
	M3	60	0,76
	M4	80	1,02
	M5	2,3	0,25
Macrofibra sintética de polipropileno	M6	4,6	0,51
	M7	7,0	0,76
	M8	9,3	1,02

En la Tabla 2.13 se presentan los resultados del ensayo ASTM C1609 para todas las mezclas ensayadas.

Tabla 2.13. Resistencia a flexión, Resistencia Residual y Tenacidad obtenida para cada mezcla mediante el ensayo ASTM C1609.

Mezcla	Material	f_1 [MPa]	f_{150} [MPa]	Tenacidad [J]
M1	Sin Fibra	4,35	0,00	5,2
M2	Acero	4,07	4,05	93,47
M3	Acero	6,07	5,71	122,27
M4	Acero	4,48	6,27	123,28
M5	Polipropileno	4,58	0,87	32,3
M6	Polipropileno	3,48	2,33	54,52
M7	Polipropileno	3,66	2,66	67,35
M8	Polipropileno	4,91	3,61	81,75

Para dosis altas de fibra de acero, se puede obtener un valor de resistencia residual mayor que el de la resistencia a flexión, como es el caso de la mezcla M4 (dosis de 1,02%) esto indica que el hormigón tiene un comportamiento “*hardening*” o endurecido, donde el material es capaz de resistir cargas mayores a la carga máxima donde ocurre la primera grieta, lo cual no ocurre con la presencia de las macrofibras sintéticas [López, 2015].

Para aplicaciones de pavimentos, se debe utilizar una dosis de macrofibra menor a 0,5% por lo tanto las mezclas que entregan información valiosa para este tipo de aplicación son la mezcla M1, M2, M5 y M6. En todos los casos donde se incluyen las macrofibras se obtiene una mayor tenacidad respecto al hormigón sin fibra, teniendo mayores valores con el uso de fibras de acero. Pese a lo anterior, las macrofibras sintéticas entregan buenos valores de resistencia residual, lo que ayudaría a tener considerables valores de resistencia a flexión efectiva en ambos casos de fibras [López, 2015].

2.6.1.3 Ensayo Viga de Hormigón Reforzado con Fibras mediante ASTM C1609 en Europa.

En Europa, el Profesor Giovanni Plizzari en conjunto con otros docentes de la Universidad de Brescia, también han realizado ensayos con la norma ASTM C1609. Uno de estos ensayos, realizado el 2018, consistió en ensayar vigas con cinco mezclas diferentes, todas con 0,5% de dosis de fibra. Las fibras utilizadas se detallan en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Características de las fibras utilizadas en el ensayo ASTM C1609.

Tipo de Fibra	Acero Corta	Acero Larga	Polipropileno	Polipropileno
Forma	Extremos Enganchado	Extremos Enganchados	Rizada	Relieve
Longitud [mm]	35	60	40	54
Diámetro [mm]	0,54	0,92	0,75	0,81
Relación de Aspecto	65	65	53	67
Densidad [kg/m ³]	7850	7850	910	910

Los resultados del ensayo ASTM C1609 se muestran en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Resultados de resistencia a compresión (ASTM C39), resistencia a flexión, resistencia residual y tenacidad mediante el ensayo ASTM C1609.

Mezcla	f_c [MPa]	f_l [MPa]	f_{150} [MPa]	Tenacidad [J]
Sin fibra	42,84	5,40	0,00	0,0
Fibra de Acero corta	46,57	5,38	3,67	117,9
Fibra de Acero Larga	43,68	5,59	4,73	130,9
Fibra Sintética Rizada	46,65	5,62	2,79	70,7
Fibra Sintética en Relieve	44,66	5,66	2,84	73,8

De la Tabla 2.15 se observa que en general la resistencia a compresión, f_c , no varía mucho con la inclusión de fibras, lo que demostraría que éstas no influyen en la resistencia a compresión. Además, se puede observar que en las fibras de acero son capaces de entregarle mayor tenacidad a la mezcla de hormigón. Sin embargo, ambas fibras aportan una tenacidad extra al hormigón respecto del hormigón sin fibra [Plizzari et al., 2018].

2.6.1.4 Ensayo Viga con Acero Longitudinal de Hormigón Reforzado con Fibras mediante Flexión en Europa.

Durante el mismo año, 2018, Giovanni Plizzari junto a Antonio Conforti y Raúl Zerbino ensayaron a flexión vigas reforzadas con acero longitudinal y transversal. La diferencia de este ensayo es que se obtuvieron resultados respecto a los anchos de grieta y su separación. La geometría y refuerzo de acero de las vigas se detallan en la Figura 2.27.

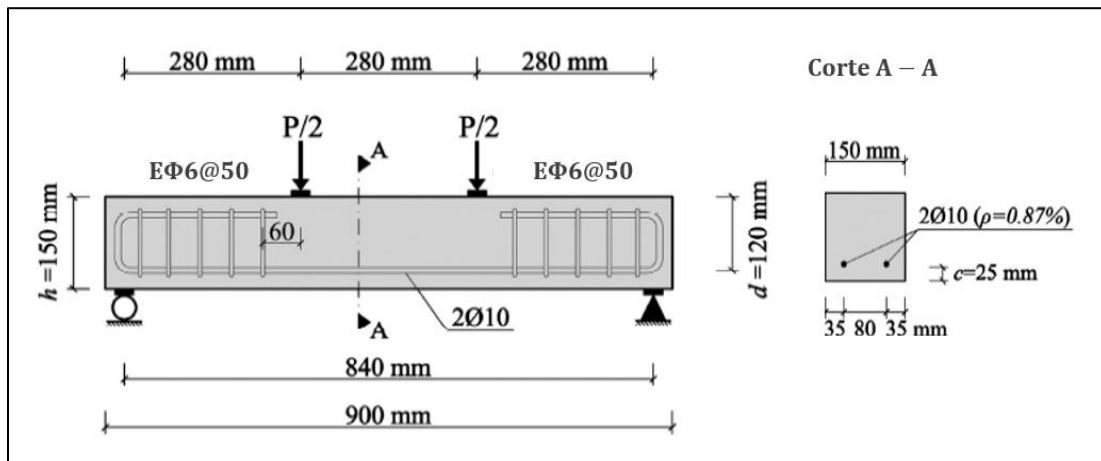


Figura 2.27. Geometría y Refuerzo de Acero utilizado en las vigas de ensayo.

Las fibras utilizadas se especifican en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16. Características de las fibras utilizadas en el ensayo con vigas reforzadas.

Designación Fibra	A	V	P
Tipo	Acero	Vidrio	Polipropileno
Forma	Extremo Enganchado	Rizada	Relieve
Longitud [mm]	50	36	58
Diámetro [mm]	1,00	0,54	0,67
Relación de Aspecto (L/d)	50	67	86
Densidad [kg/m ³]	7850	2680	910

Mientras que las mezclas y dosis utilizadas se muestran en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Tipos de mezclas a ensayar junto a sus dosis de fibra.

Mezcla	Tipo de Fibra	Contenido de fibra [kg/m ³]	Volumen [%]
Control	-	0	0,00
A-25	Acero	25	0,32
A-50	Acero	50	0,64
V-6	Vidrio	6	0,22
V-12	Vidrio	12	0,44
P-5	Polipropileno	5	0,55
P-10	Polipropileno	10	1,10

Este ensayo a flexión consiste en cargar, en los tercios, una viga reforzada con barras de acero de 900 mm de longitud. La viga se carga a una razón de 0,3 mm/min hasta su falla y dura aproximadamente 2 horas en total. Al espécimen se le colocan dos dispositivos, uno para registrar la deflexión en la mitad del vano y el otro para medir los anchos de grieta en el tercio central de la viga. La prueba se pausa en dos estados de carga para registrar los anchos de grieta: cuando la carga aplicada llega a 40 kN (50% de la capacidad de la viga) y cuando la carga llega a 56 kN (70% de la capacidad de la viga). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Resultados obtenidos del ensayo de vigas de hormigón reforzado con acero convencional y macrofibra estructural.

Mezcla	P_{cr} [kN]	δ_{40} [mm]	$w_{m\acute{a}x}(P_{40})$ [mm]	$w_{m\acute{a}x}(P_{56})$ [mm]	S_r [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	δ_u [mm]
Control	13,0	1,43	0,15	0,22	88	77,5	15,7
A-25	12,9	1,26	0,10	0,17	69	85,4	15,8
A-50	13,9	1,03	0,07	0,13	62	87,9	14,1
V-6	11,8	1,31	0,10	0,17	71	79,5	15,5
V-12	12,7	1,27	0,10	0,15	65	78,0	13,8
P-5	13,3	1,30	0,13	0,22	69	79,0	15,9
P-10	13,8	1,20	0,13	0,20	61	82,4	17,6

En la Tabla 2.18 se muestran los resultados obtenidos para la carga de agrietamiento a flexión (P_{cr}), deflexión neta a la mitad del vano a una carga aplicada de 40 kN (δ_{40}), máxima apertura de grieta cuando se aplican 40 kN de carga ($w_{m\acute{a}x}P_{40}$), y cuando la carga aplicada es de 56 kN ($w_{m\acute{a}x}P_{56}$), espaciamiento promedio de grietas en etapa estabilizada (s_r), la carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) y la máxima deflexión neta a la mitad del vano (δ_u).

De la Tabla 2.18 se obtiene que la carga de agrietamiento (P_{cr}) es similar para todos los casos, con un leve incremento al utilizar fibra. Además, con el uso de fibra la deflexión de la viga a una carga fija (40 kN) disminuye en comparación con la viga de control. También se ve que los anchos máximos de grieta en ambos estados de carga disminuyen con la inclusión de fibras, siendo las fibras de acero las que mayores reducciones provoca, es decir, se obtienen grietas de menor apertura, y por lo tanto el espaciamiento entre éstas se reduce, resultando en un patrón menos distribuido de agrietamiento. Y, por último, con el uso de fibra la viga es capaz de alcanzar un valor más alto de máxima carga de falla ($P_{m\acute{a}x}$), lo que está relacionado también con el uso del refuerzo longitudinal de acero. En la Figura 2.28 se muestran las curvas de Carga vs Deflexión promedio en el medio del vano de las mezclas con fibra y de control.

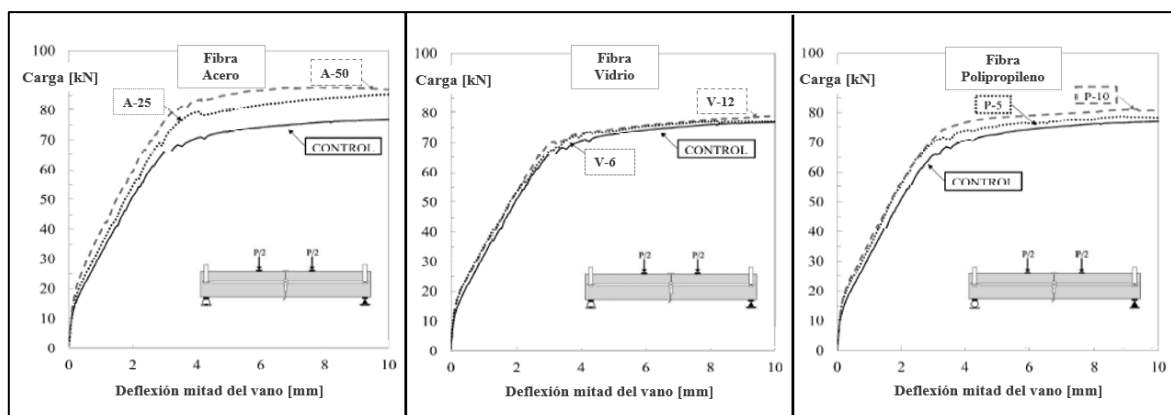


Figura 2.28. Respuestas Carga – Deflexión en la mitad del vano para vigas reforzadas de HRF de acero (izquierda), de vidrio (centro) y sintética (derecha).

En la Figura 2.28 se identifican tres etapas. En la primera etapa no existen grietas ni se observa influencia de las fibras. Luego viene la segunda etapa donde ocurre el agrietamiento, acá se forman las grietas y se estabilizan. Y finalmente en la tercera etapa fluyen las barras, donde se observa una mayor tenacidad, a mayor dosis de fibra incluida en la mezcla [Plizzari et al., 2018].

Comparando los gráficos anteriormente mostrados, se puede ver que la fibra de acero es la que tiene mayor influencia en ambos estados de servicialidad. En Estado Límite de Servicio (ELS) se observan menores deflexiones en la etapa de agrietamiento y en Estado Último de Servicio (EUS) se ve que llega a una máxima capacidad de carga mayor en comparación a las otras fibras. Y se observa

aún más influencia en la mezcla A-50 que en la mezcla A-25, es decir, cuando se aumenta la dosis de macrofibra. Por otro lado, en las mezclas con macrofibras de vidrio se ve un pequeño incremento en la capacidad de carga que podría ser casi despreciado. Y finalmente, en las mezclas que incluyen macrofibras sintéticas también refleja que la fibra influye en ambos estados de servicialidad, pero en menor medida que las fibras de acero [Plizzari, et al., 2018].

2.6.2 Ensayos en Laboratorio a Gran Escala

Adicional a los ensayos de vigas mediante ASTM C1609, el Dr. Jeffery Roesler y otros investigadores [Roesler et al., 2004] llevaron a cabo un ensayo a gran escala de una losa en laboratorio, el cual consistía en obtener la respuesta de Carga – Deflexión de la losa cuando se carga en su punto central y en el borde. Las dimensiones de la losa cuadrada son 2200x2200x130 [mm].

Se utilizaron seis especímenes, los cuales tenían mismo diseño de mezcla de hormigón (Tabla 2.19), pero distintos tipos de fibra.

Tabla 2.19. Componentes de la mezcla de hormigón. $f'_c = 35$ [MPa], $MOR = 5$ [MPa].

Agregado grueso [kg/m ³]	976
Agregado fino [kg/m ³]	807
Cemento [kg/m ³]	360
Agua [kg/m ³]	183
Plastificante [ml/100kg]	1117
Razón agua/cemento	0,51

En la Figura 2.29 se muestran los tipos de fibras y refuerzos utilizados en este ensayo. Sus características se entregan en la Tabla 2.20.

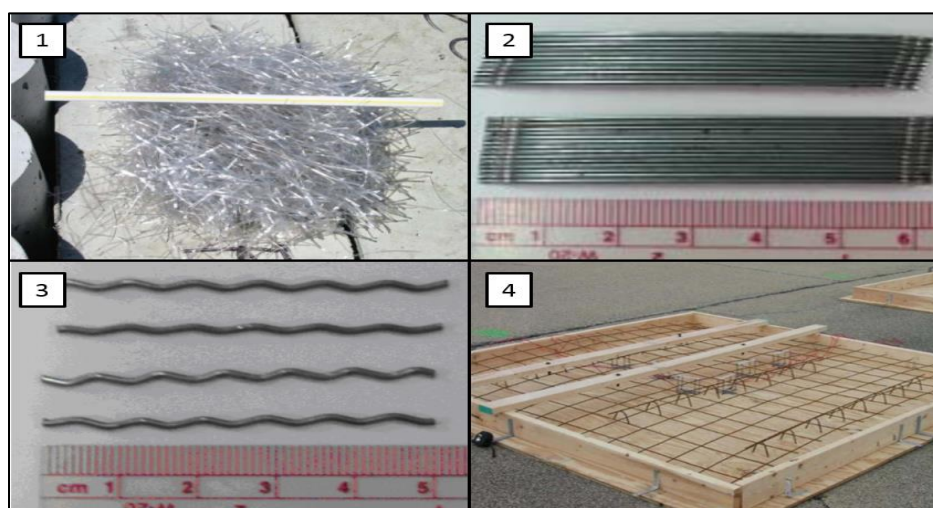


Figura 2.29. Tipos de refuerzos utilizados en el ensayo. (1) Fibra sintética recta. (2) Fibra de acero extremos enganchados. (3) Fibra de acero rizada. (4) Malla electrosoldada de $A_s = 1,2 \left[\frac{cm^2}{m} \right]$.

Tabla 2.20. Características de las fibras utilizadas en el ensayo.

N° Fibra	1	2	3
Material	Polipropileno	Acero	Acero
Forma	Recta	Extremos Enganchado	Rizada
Longitud [mm]	40	60	50
Relación de Aspecto (L/d)	90	65	50
Módulo Elástico [GPa]	9,5	180	180

A continuación, se enlistan las mezclas y dosis de los seis especímenes a ensayar:

1. Mezcla sin fibra.
2. Mezcla con dosis de 0,48% de fibra sintética recta.
3. Mezcla con dosis de 0,32% de fibra sintética recta.
4. Mezcla con dosis de 0,35% de fibra de acero con extremos enganchados.
5. Mezcla con dosis de 0,50% de fibra de acero rizada
6. Mezcla sin fibras reforzada con malla electrosoldada.

Cada una de las losas se procede a cargar en el centro, como se observa en la Figura 2.30, hasta su falla. Los resultados de los ensayos se muestran en la Figura 2.31 y Tabla 2.21.

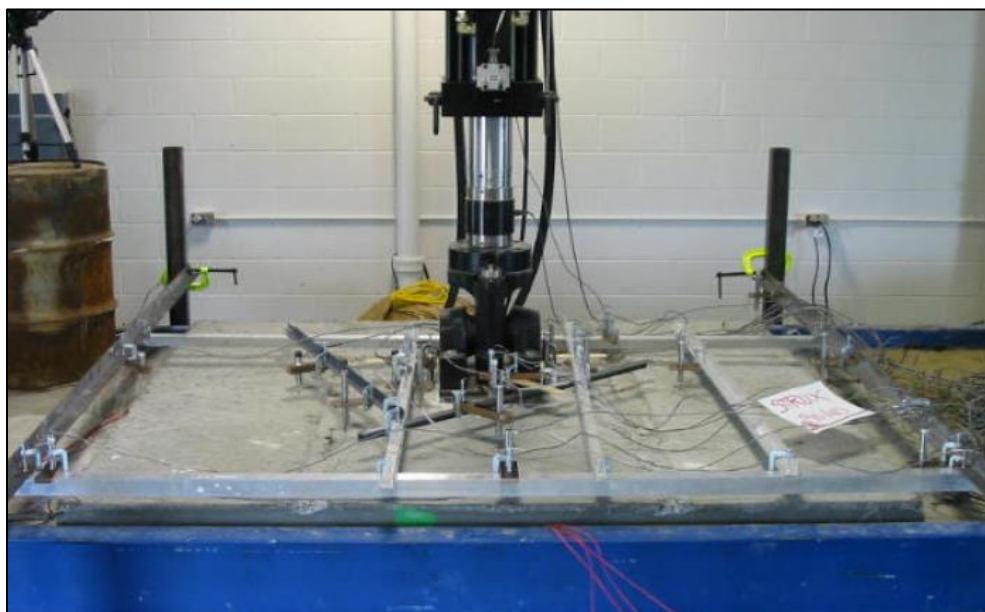


Figura 2.30. Configuración del ensayo de losa cargada en el centro.

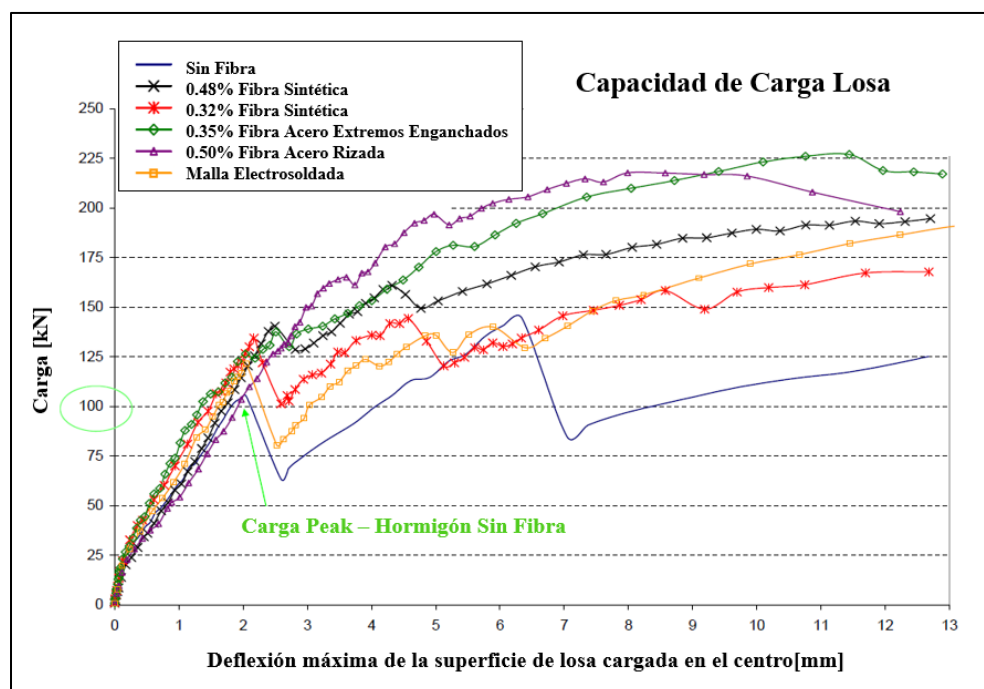


Figura 2.31. Respuesta Carga – Deflexión para los seis especímenes.

Tabla 2.21. Resultados del ensayo de losa cargada en el centro para cada muestra

Muestra	Carga peak [kN]	Carga Última [kN]
Sin fibra	108	135
0,48% Fibra sintética	143	195
0,32% Fibra sintética	135	174
0,35% Fibra acero extremo enganchado	141	228
0,5% Fibra de acero rizado	167	220
Malla Electrosoldada	122	201

Como se puede observar de la Figura 2.31 y Tabla 2.21, el comportamiento en las muestras con fibra es mucho mejor que la muestra sin fibra (línea azul) y que la muestra con malla electrosoldada (línea naranja). Se observa una mayor área bajo la curva en los casos con fibra, y un mayor valor de resistencia última, es decir para un mismo nivel de deformación, las muestras con fibras son capaces de aguantar mayor carga una vez agrietadas. Además, la fibra que tiene mejor comportamiento nuevamente es la fibra de acero de extremo enganchado (línea verde), pese a no tener el mismo nivel de concentración como lo tienen la fibra sintética (línea negra). Lo anterior puede atribuirse a que el acero es un mejor material (en cuanto a módulo elástico y resistencia a tracción) que el polipropileno y también la forma de extremos enganchados ayuda mucho a mejorar la adherencia entre la mezcla y la fibra, y así tener mayor eficiencia a la hora de mejorar propiedades como la tenacidad o la dureza del hormigón [Roesler, 2019; Roesler et al., 2004].

Luego, se procede a cargar otros dos especímenes en el borde de la losa, tal como se muestra en la Figura 2.32. En este caso solo se ensayaron dos muestras: sin fibra y con dosis de 0,48% de fibra sintética.

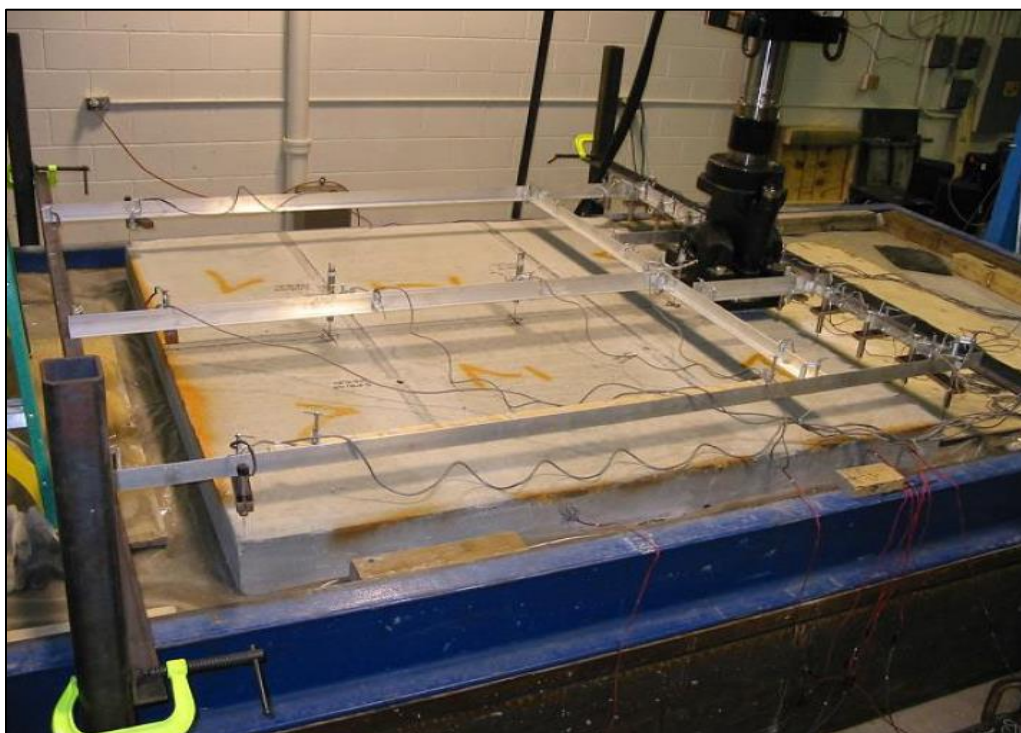


Figura 2.32. Configuración de ensayo para losa cargada en el borde.

Los resultados del ensayo se muestran en la Figura 2.33 y Tabla 2.22.

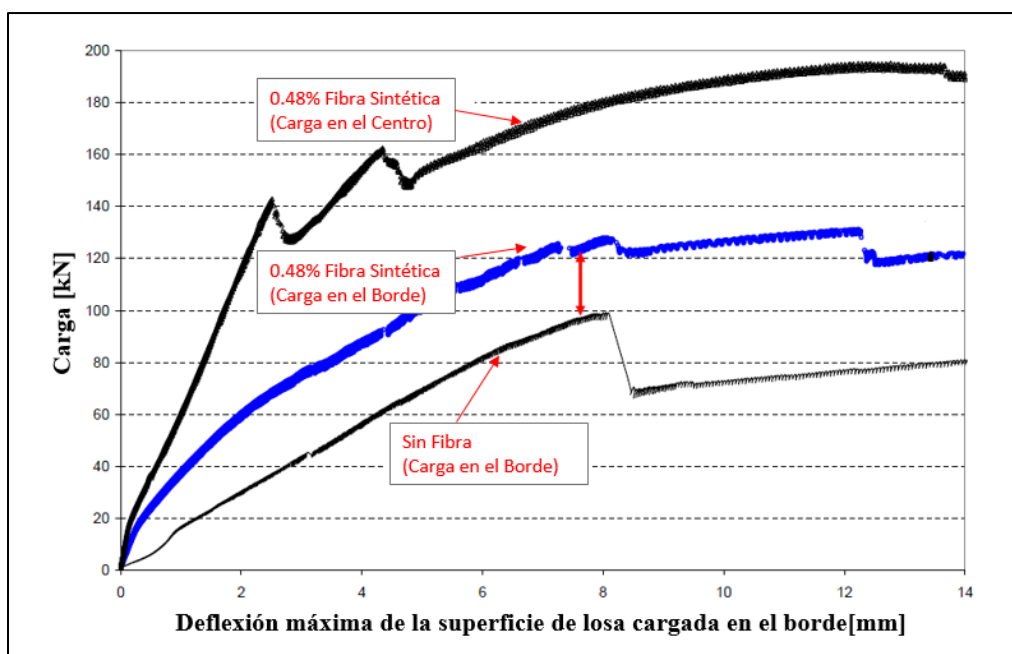


Figura 2.33. Respuesta Carga – Deflexión para ambas muestras ensayadas (línea azul y negra delgada). La línea negra gruesa muestra la respuesta de la muestra con fibra sintética cuando es cargada en el centro.

Tabla 2.22. Resultados numéricos del ensayo para cada muestra cuando son cargadas en el borde.

Muestra	Carga Peak [kN]	Carga Última [kN]
Sin fibra	99	96
0,48% Fibra Sintética	126	131

Al analizar los resultados obtenidos en la Figura 2.33 y Tabla 2.22, es posible notar que, cuando la losa se carga en el borde, ésta adquiere menor tenacidad (área bajo la curva). Mientras que, al comparar ambas losas cargadas en el borde, el espécimen que contiene una dosis de 0,48% de dosis de macrofibra sintética es capaz de disipar una mayor cantidad de energía, logrando mayor tenacidad y alcanzando mayores valores de carga última en la falla, en comparación con el espécimen sin fibra [Roesler, 2019; Roesler et al., 2004].

Es posible verificar que la presencia de las macrofibras en losas de hormigón puede (1) reducir el espesor de losa para un mismo rendimiento, (2) aumentar el rendimiento para un mismo espesor de losa, (3) aumentar el tamaño de losa para obtener el mismo desempeño, y (4) otorgar una servicialidad extra luego del agrietamiento [Roesler, 2019].

2.6.3 Ensayos a Escala Real

2.6.3.1 Ensayo Acelerado con Máquina ATLAS

Otro ensayo realizado por el Dr. Jeffery Roesler y otros investigadores [Roesler et al., 2012] en la Universidad de Illinois el año 2007, consistió en una prueba acelerada a escala real en losas. Este ensayo tuvo como fin, evaluar los efectos del espesor de losa, condiciones de soporte y el uso de macrofibras en un sistema de losas cortas que fueron cargadas por el borde con la máquina ATLAS (Figuras 2.34 y 2.35). Se compararon los resultados de losas de 9 cm de espesor de hormigón reforzado con fibras con los de losas de hormigón sin fibra de mismo espesor y mismas dimensiones (1,8 x 1,8 m) [Roesler et al., 2012].



Figura 2.34. Ensayo acelerado de la Universidad de Illinois.

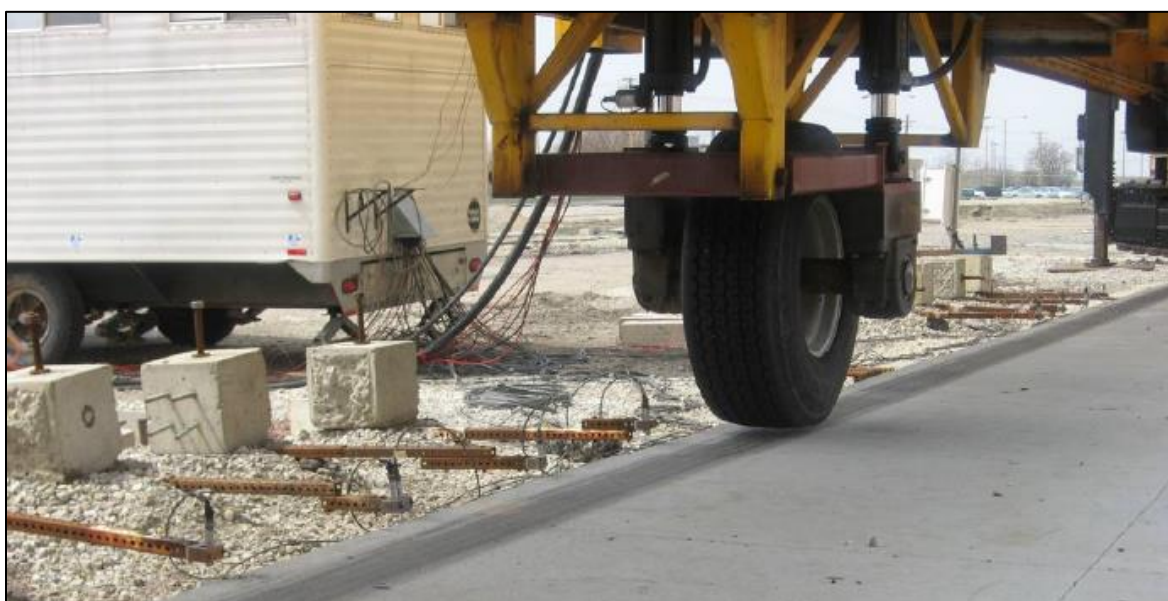


Figura 2.35. Ensayo acelerado de la Universidad de Illinois.

En la Figura 2.36 se observa el resultado final de las losas en los paños de espesor de 9 [cm] de hormigón reforzado con fibras y sin reforzamiento. En la Tabla 2.23 se detallan los ejes equivalentes y porcentajes de agrietamiento en función de la cantidad de pasadas de la máquina ATLAS en estos paños de losa.



Figura 2.36. Estado final de los paños de losa de 9 cm. A la izquierda sin fibras y a la derecha con incorporación de fibras.

Tabla 2.23. Porcentaje de agrietamiento en los paños de losa de 9 cm sin fibra y con fibra, en función de la carga aplicada, el número de pasadas y los ejes equivalentes.

Carga [kN]	Pasadas	EE acumulados	% Agrietamiento	
			Losa sin fibra	Losa con fibra
22,2	2643	4477	0,0	0,0
22,2	2778	9183	0,0	0,0
40,0	3000	69183	0,0	0,0
40,0	309	75363	0,0	0,0
40,0	5875	192863	57,1	14,3
40,0	2053	233923	57,1	28,6
53,4	10	234592	100	42,9

De la tabla anterior se desprende que una vez que el paño sin fibra llega a su 100% de agrietamiento, el paño de losa de hormigón reforzado con fibra recién se ha agrietado un 43% para el mismo nivel de carga, pasadas y ejes equivalentes. Es notorio como la influencia de las fibras en la mezcla ayuda a disminuir la cantidad de grietas y la tasa de deterioro de estas, junto con una disminución en la deflexión de la losa para mismo nivel de repeticiones de carga, lo cual se traduce en una mayor vida útil del pavimento [Roesler et al., 2019; Roesler et al., 2012].

2.6.3.2 Ensayo de Escala Real realizado en Sudáfrica.

Finalmente, W. A. Elsaigh y otros autores, en el año 2005 realizaron otro ensayo acelerado a escala real de un pavimento con fibra. El experimento se llevó a cabo a la salida de un camino al oeste de Johannesburgo. El pavimento tenía un ancho de 3,6 [m] y se subdividió en once secciones con distinto refuerzo:

- Sección #1 a #3: hormigón reforzado con fibra.
- Sección #4 a #6: hormigón con malla electrosoldada.
- Sección #7 a #11: hormigón sin fibra.

La sección #2 (con fibra) fue diseñada para alcanzar la misma capacidad de carga que la sección #7 (sin fibra) con igual condiciones de apoyo, la diferencia fue que en la sección #2 se redujo el espesor para considerar los beneficios de la fibra. Además, la sección #2 está compuesta de 4 losas con juntas espaciadas cada 4 o 6 m, mientras que la sección #7 se compone de 6 losas espaciadas cada 2 o 3 m. Ambas secciones fueron posicionadas sobre una subbase de 125 mm de espesor. Los Ejes Equivalentes de diseño fueron 320.000 y la fibra utilizada se utilizó en dosis de 30 kg/m³ de fibra de acero de extremo enganchado de 60 mm de longitud, 0,75 mm de diámetro y resistencia a la tracción de 1100 MPa.

Un panel de expertos fue invitado a evaluar el estado del camino compuesto por las secciones. El panel debió evaluar las secciones pensando en su uso frente a tres escenarios: carreteras, calles y estacionamientos. Un puntaje 0 representa perfectas condiciones, mientras que un 100 completa falla, en la Figura 2.37 se muestran los resultados.

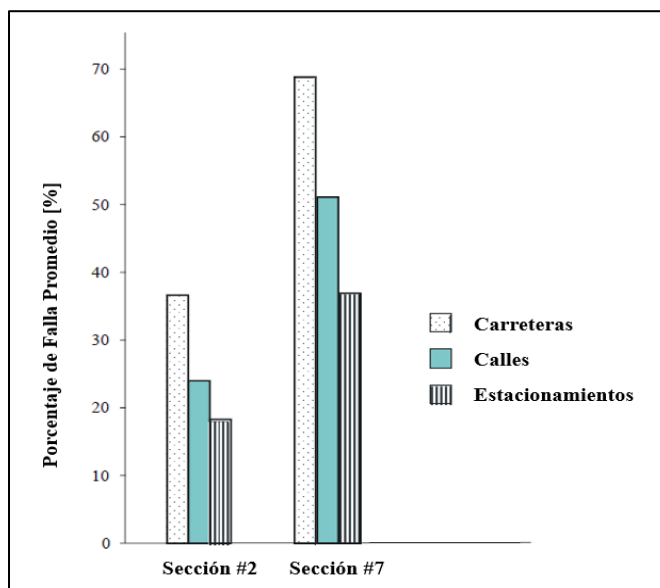


Figura 2.37. Porcentajes de falla para cada sección para ser usada en carreteras, calles o estacionamientos.

La sección #2 tiene significativamente menor falla que la sección #7 para cualquiera de las tres aplicaciones (carreteras, calles o estacionamientos). Mientras que se tiene un mejor desempeño si se utilizara en estacionamientos, sin embargo, la inclusión de las fibras minimiza la presencia de agrietamiento [Elsaigh et al., 2005]. Las condiciones finales de las losas se muestran en las Figuras 2.38, para la sección #2 y Figura 2.39, para la sección #7.



Figura 2.38. Situación final para las losas de la sección #2 (con fibra).



Figura 2.39. Situación final para las losas de la sección #7 (sin fibra).

La superficie de las losas de la sección #2 (con fibra) resultó menor dañada en comparación con la sección #7 (sin fibra). La apariencia de las fotos presentadas anteriormente confirma los resultados de una inspección visual llevada a cabo por el panel de expertos, la cual indica que el espesor de pavimento de hormigón puede reducirse al utilizar macrofibras en la mezcla. Finalmente,

el efecto de curvatura y pandeo, más conocido como alabeo, de las losas no se vieron afectados [Elsaigh et al., 2005].

2.7 Beneficios de Utilizar Fibra en el Hormigón

A continuación, se presentan los múltiples beneficios de incorporar fibras a la mezcla de hormigón para aplicaciones de pavimentos.

- Aumenta la resistencia al agrietamiento y la serviciabilidad post agrietamiento [Roesler, 2019; López, 2015; SIKA, s.f.; Plizzari et al., 2018].
- Aumento en la capacidad estructural de la losa, en términos de tenacidad y dureza [Roesler, 2019; López, 2015; SIKA, s.f.; TCPavements, s.f.; Plizzari et al., 2018].
- Disminuye los anchos de grieta [Roesler et al., 2019; SIKA, s.f.; Plizzari et al., 2018].
- Disminuye la cantidad de grietas y el espaciamiento entre ellas [López, 2015; Plizzari et al., 2018].
- Mantiene anchos de juntas transversales y longitudinales, lo que permite evitar el movimiento de losas [Roesler, 2019].
- Reduce la tasa de deterioro de grietas luego de que ha ocurrido el agrietamiento [Roesler, 2019; Roesler et al., 2019; López, 2015].
- Puede reducir el espesor de losa para el mismo desempeño o vida útil que un hormigón sin fibra [Roesler et al., 2019; Roesler, 2019; TCPavements].
- Si se decide mantener el espesor de losa respecto a losas de hormigón sin fibra, el HRF otorga mayor rendimiento y durabilidad, y por lo tanto mayor vida útil al pavimento [Roesler et al., 2019; Roesler, 2019; SIKA, s.f.; TCPavements, s.f.; Barchip, 2019; Plizzari et al., 2018; Plizzari et al., 2019; López, 2015].
- Para alcanzar la misma vida útil de un pavimento de hormigón sin fibra, se puede aumentar el tamaño de losa del pavimento de HRF [Roesler, 2019].
- Falla dúctil del material [López, 2015; TCPavements, s.f.; Plizzari et al., 2019].
- Aumenta la resistencia al impacto y a la abrasión [López, 2015; SIKA, s.f.; TCPavements, s.f.; Barchip, 2019].
- Previenen la fisuración del hormigón antes de las 24 horas [SIKA, s.f.; Roesler et al., 2019].
- Aumenta la resistencia a la fatiga [Roesler et al., 2019; SIKA, s.f.; TCPavements, s.f.].

En la Tabla 2.24 se presenta un resumen de los beneficios de utilizar hormigón reforzado con fibras.

Tabla 2.24. Resumen de los principales beneficios del hormigón reforzado con fibras según algunos investigadores.

Beneficio de las fibras en el hormigón	Jeffery Roesler	Giovanni Plizzari	Jorge López	SIKA	TCP
Aumenta resistencia al agrietamiento	si	si	si	si	si
Aumenta la resistencia a la fatiga	si	no	no	si	si
Aumenta la resistencia al impacto	no	no	si	si	si
Aumenta la tenacidad	si	si	si	si	si
Reduce o limita el ancho de grietas	si	si	si	no	no
Reduce las tasas de deterioro de grietas	si	no	si	no	no
Aumenta la durabilidad o vida útil	si	si	si	si	si
Reduce el movimiento de losa	si	no	no	no	no
Falla dúctil del material	no	si	si	no	si
Reducción de espesores de la losa	si	no	no	no	si

2.8 Aplicaciones de Hormigón Reforzado con Fibras

En este ítem se presentan algunas aplicaciones de pavimentos de hormigón reforzado con macrofibras estructurales.

El Dr. Jeffery Roesler en 2012 lleva a cabo una inspección en distintos lugares de Illinois para verificar el correcto funcionamiento del hormigón reforzado con fibras [Roesler, 2019]. En las Figuras 2.40 a 2.44 se muestran estos proyectos junto a su detalle.



Figura 2.40. Parada de Autobuses en Chicago, construida el año 2003.



Figura 2.41. Camino interior en el condado de Kane, construido el año 2004.

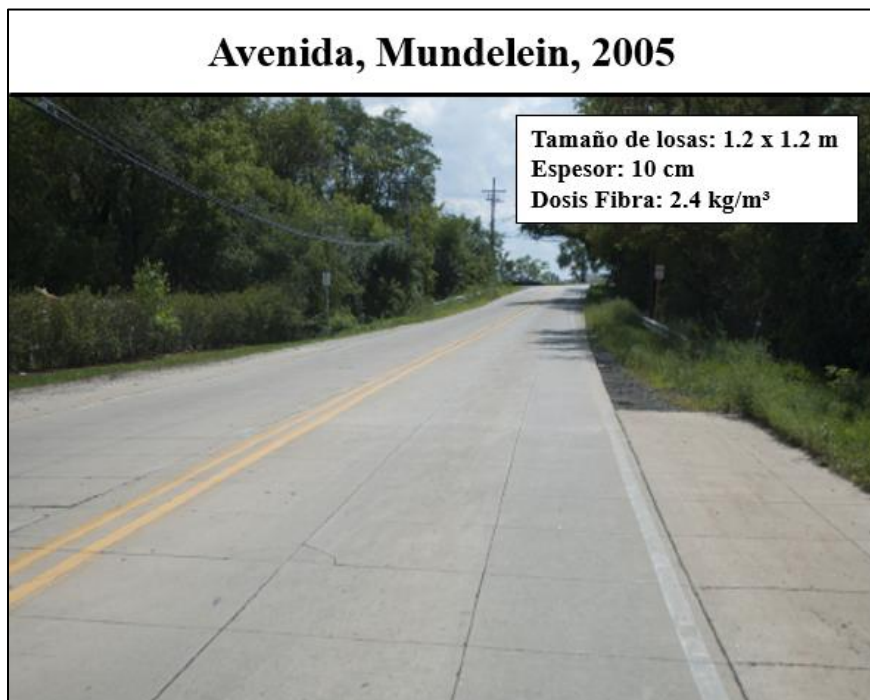


Figura 2.42. Avenida en Mundelein en el condado de Lake, construida el 2005.



Figura 2.43. Estacionamiento de la Universidad de Illinois, construido el año 2006.

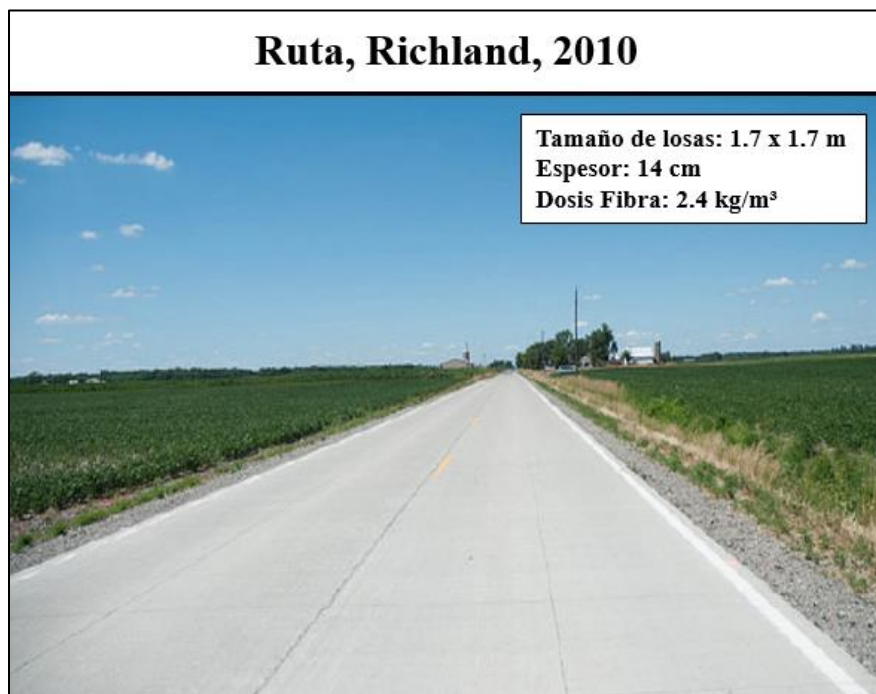


Figura 2.44. Ruta en el condado de Richland, construida el año 2010.

De las inspecciones a los proyectos indicados en las Figuras anteriores en el año 2012, indican que las fibras cumplen un rol importante para un buen rendimiento de pavimento, manteniendo juntas

unidas y reduciendo el riesgo de fallas, además de que, en situaciones de fallas, las fibras ayudan a mantener los anchos de grietas pequeños permitiendo un pavimento liso y útil [Roesler, 2019].

Por otra parte, Ana Blanco, en su tesis el año 2008, presenta las aplicaciones de pavimentos que se muestran en la Figura 2.45, construidas con hormigón reforzado con fibras de acero.



Figura 2.45. Aplicaciones de pavimentos de hormigón reforzado con fibras en Europa.

En cuanto a aplicaciones de hormigón reforzado con fibras en aeropuertos, en Turquía se implementó esta tecnología en un pavimento de uno de sus aeropuertos, utilizando macrofibras sintéticas de la empresa BarChip. Este proyecto ubicado en el Aeropuerto Internacional Sabiha Gokcen de Estambul, contempló 155.000 m² de hormigón reforzado con macrofibra BarChip48 (Anexo B), con una resistencia a compresión de 30 MPa y espesor del pavimento de 10 cm. BarChip48 ofreció una durabilidad superior, procesos in-situ simplificados y significativas ventajas de tiempo y costo [Barchip, s.f.]. En la Figura 2.46 se observa una imagen de dicho proyecto.

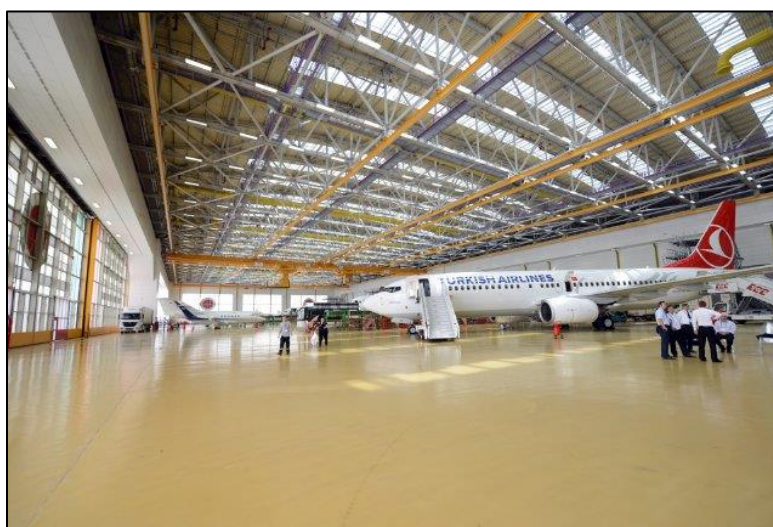


Figura 2.46. Proyecto de hormigón reforzado con macrofibra BarChip48 en Turquía.

Por otra parte, en el Aeropuerto de Palma de Mallorca, en España, el año 2009 se implementó la tecnología de hormigón reforzado con fibra en una de sus plataformas para ser utilizada como calle de rodaje en su zona más externa y como zona de estacionamiento para aeronaves. Este proyecto contempló losas cuadradas de 5 metros de lado, de 30 cm de espesor, alcanzando una superficie total de 51.000 m². Se utilizaron 600 gramos de fibra de polipropileno de 12 mm por m³.

Se utilizó hormigón reforzado con fibra dado que la plataforma estaría sometida a grandes masas de tráfico rodado, por lo que era necesario solucionar el problema de refuerzo y de resistencia a la abrasión que iba a soportar dicho hormigón, aumentando así su durabilidad y evitando en gran medida la fisuración por retracción plástica. En la Figura 2.47 se puede observar esta plataforma terminada.

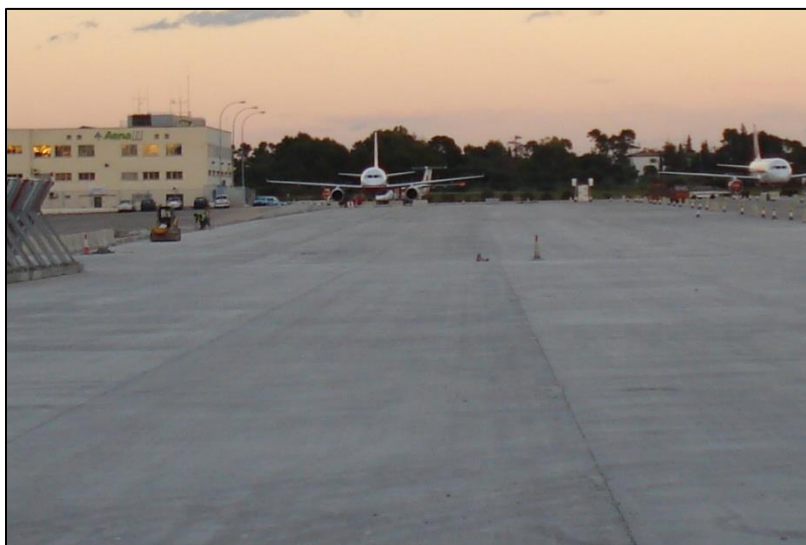


Figura 2.47. Plataforma del Aeropuerto de Palma de Mallorca, construida con hormigón reforzado con fibras.

Finalmente, en Chile también se ha aplicado la tecnología de hormigón reforzado con fibras para aplicaciones de pavimentos. Desde el año 2010 aproximadamente, la empresa TCPavements ha llevado a cabo 49 proyectos de hormigón reforzado con fibra construidos con la geometría de losas optimizadas, en aplicaciones de pavimentos del tipo bajo tránsito, carretera, pisos industriales, estacionamientos y urbanizaciones. A continuación, se enlistan solo los proyectos con espesor de pavimento entre 15 y 25 cm.

- Acceso Planta Áridos en Puerto Varas, año 2013: Pavimento industrial de 17 cm de espesor, 1 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 4,8 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 7.728.000. Superficie total de 2.500 m².
- Reemplazo de Losas en Ruta 5 Sur, Los Lagos, año 2013: Carretera de 16 cm de espesor, 2 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 4,8 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 30.000.000. Superficie total de 171 m².

- Pavimento Alameda en Plaza de la Ciudadanía, año 2014: Pavimento urbano de 19 cm de espesor, 1 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 4,8 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 100.000.000. Superficie total de 5.000 m².
- Megacentro Ebco en Noviciado, año 2014: Pavimento industrial de 15 cm de espesor, 1 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 4,8 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 3.800.000. Superficie total de 7.000 m².
- Ruta 60, Camino La Pólvara, año 2016: Carretera de cuatro pistas de 23 cm de espesor, 1 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 5,0 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 189.000.000. Distancia total de 15 km.
- Bodega Carga Nacional en Santiago, año 2017: Pavimento industrial de 16 cm de espesor, 1 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 5,65 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 3.050.000. Superficie total de 10.080 m².
- Ruta 201 en Coñaripe, año 2019: Carretera de doble pista de 15 cm de espesor, 1 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 4,8 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 5.000.000. Distancia total de 5 km.
- Rampa Transbordador en Punta Arenas, año 2019: Pavimento industrial de 20 cm de espesor, 2 m de espaciado de juntas, resistencia a flexión de 4,4 MPa, diseñado para un número de ejes equivalentes de 10.000.000.

CAPÍTULO 3 FACTIBILIDAD TÉCNICA – ECONÓMICA

Para llevar a cabo la factibilidad económica de utilizar hormigón reforzado con fibra en pavimentos de aeropuerto, se hace necesario comparar el costo, mediante presupuestos, de un proyecto de pavimentación de HRF con el de un pavimento de hormigón sin fibra de misma superficie y mismo espesor de base, ubicado en el área de movimiento del Aeropuerto Arturo Merino Benítez.

3.1 Antecedentes del Proyecto

El proyecto “Conservación Mayor Pista 17L-35R y Rodajes Asociados Aeropuerto A.M.B.”, se licitó el año 2018 por medio de la Dirección de Aeropuertos del Ministerio de Obras Públicas. Este proyecto se desarrolla en la comuna de Pudahuel, Región Metropolitana, específicamente en el Aeropuerto Arturo Merino Benítez, y considera la conservación del pavimento asfáltico existente en la pista 17L-35R y la conservación de losas de hormigón en la calle de rodaje Kilo entre las calles de rodaje Hotel y Juliet, con el fin de mantener los estándares de seguridad y operatividad del Aeropuerto.

En la Figura 3.1 se muestra la ubicación de este proyecto. La línea roja muestra la ubicación de la calle de rodaje Kilo, donde se realiza la conservación de losas de hormigón, mientras que la línea amarilla muestra el sector de la pista 17L-35R donde se realiza la conservación del pavimento asfáltico.

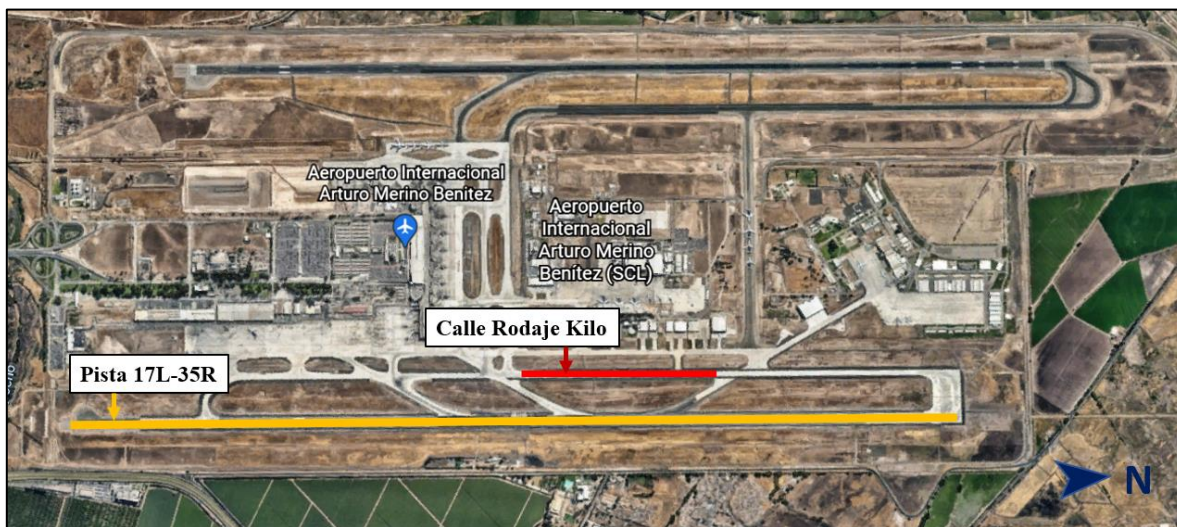


Figura 3.1. Ubicación del proyecto.

El proyecto consiste en realizar un fresado y recapado de asfalto en la pista 17L-35R, además de aplicar un sello protector bituminoso y sello de grietas. Mientras que en la calle de rodaje se realiza una conservación de las losas entre el kilómetro 1,75 hasta el 2,50, alcanzando 16.740 m² de

superficie. Para efectos de esta tesis, solo se consideran los ítems, costos y tiempos asociados a los pavimentos de hormigón de la calle de rodaje Kilo. En la Tabla 3.1 se muestran las dimensiones geométricas de esta calle de rodaje.

Tabla 3.1. Dimensiones de la calle de rodaje Kilo.

Longitud [m]	744
Ancho total [m]	22,5
Área [m ²]	16.740
Tamaño Losas	4,5 m x 5 m

La conservación de la calle de rodaje Kilo consistió en excavar el espesor completo de losas de hormigón, base chancada y terraplén, equivalente a 1,15 m de profundidad total, y volver a colocar nuevos espesores de éstos mismos. En la Figura 3.2 se muestran los espesores, de hormigón, base chancada y terraplén, que existían antes de la conservación y los espesores nuevos, construidos con hormigón sin fibra en el año 2018, los cuales se verifican posteriormente.

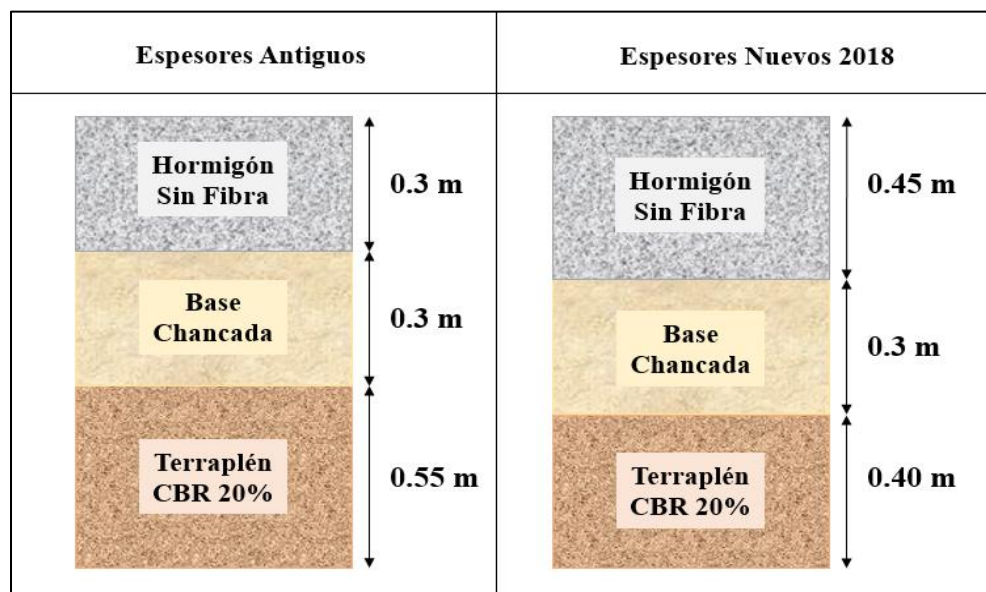


Figura 3.2. Espesores antiguos y actuales del proyecto de conservación de la calle de rodaje Kilo.

3.2 Cotización de Fibras

Para llevar a cabo un correcto presupuesto de hormigón reforzado con fibra, es necesario cotizar distintas fibras que se ofrezcan en el mercado. Los principales proveedores de fibra en Chile son las empresas Barchip (proyectos de Codelco y Alto Maipo) y Sika. Ambas empresas trabajan y recomiendan macrofibras sintéticas para aplicaciones de pavimento, dado que son mucho más fáciles

de manipular, son más económicas y no se corroen. En la Tabla 3.2 se muestran las opciones de macrofibras entregadas directamente por la empresa BarChip y Sika.

Tabla 3.2. Características y precios para la fibra BarChip48 y Sika Enduro Mirage.

Nombre de Fibra	BarChip 48	Sika Enduro Mirage
Longitud [mm]	48	54
Diámetro [mm]	0,7	0,9
Relación de Aspecto	69	59
Forma	Relieve	Relieve
Peso Específico [kg/m ³]	890 - 910	910
Precio [\$/kg fibra]	\$4.000 + IVA	\$4.000 + IVA
Precio por mayor* [\$/kg fibra]	\$3.500 + IVA	\$3.700 + IVA

* Mayor a 20 toneladas en el caso de la fibra BarChip48, y mayor a 5 toneladas en el caso de Sika.

En la Figura 3.3 se muestran la fibra BarChip48 y Sika Enduro Mirage.



Figura 3.3. Fibra BarChip48 a la izquierda y Sika Enduro Mirage a la derecha.

Además de la información entregada en la Tabla 3.2, los proveedores entregan las dosis recomendadas de cada macrofibra junto a su respectiva resistencia residual, f_{150} en MPa, para aplicaciones de pavimentos. Esta información se detalla en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Dosis y resistencias residuales para cada tipo de fibra.

Nombre Fibra	BarChip 48			Sika Enduro Mirage
Volumen [%]	0,33	0,38	0,44	0,38
Dosis [kg/m ³]	3,0	3,5	4,0	3,5
Resistencia Residual, f_{150} [Mpa]	1,25	1,45	1,65	1,2

Como se puede observar en las Tablas 3.2 y 3.3, ambas macrofibras cumplen con lo expuesto en el Capítulo 2, ítem 2.1 “Características y Tipos de fibras”, respecto a su longitud, relación de aspecto, forma y volumen de fibra recomendado para aplicaciones de pavimentos o recapados (menor a 0,5%) [Roesler et al., 2019].

3.3 Diseño Espesor Pavimento de Hormigón Reforzado con Fibras

Según lo expuesto en el Capítulo 2, específicamente en el ítem 2.5 “Metodología de Diseño de Pavimentos y Recapados de Hormigón Reforzado con Fibra”, se utiliza la Ecuación 2.9 para diseñar espesores de pavimentos, la cual considera una resistencia a flexión efectiva, f_{eff} , como dato de entrada al programa de diseño. Esta resistencia a flexión efectiva toma en cuenta el valor de resistencia residual entregada por el proveedor de macrofibras, dato especificado en la Tabla 3.3 para cada macrofibra, el cual se suma al valor de resistencia a flexotracción del hormigón utilizado. En el caso de los pavimentos rígidos diseñados para el Aeropuerto, el valor de resistencia a flexión o MOR, f_1 , utilizado comúnmente es de 4,8 MPa [Dirección de Aeropuertos, 2018]. En la Tabla 3.4 se muestran los valores de resistencia a flexión efectiva para cada macrofibra con el fin de llevar a cabo el diseño del pavimento de hormigón con fibra.

Tabla 3.4. Resistencia a flexión efectiva para cada dosis de ambas macrofibras.

Nombre Fibra	BarChip 48			Sika Enduro Mirage
Resistencia Residual, f_{150} [Mpa]	1,25	1,45	1,65	1,20
Resistencia Flexión, f_1 [MPa]	4,80	4,80	4,80	4,80
Resistencia Flexión Efectiva, f_{eff} [Mpa]	6,05	6,25	6,45	6,00

Por lo tanto, en lugar de ingresar como dato de entrada la resistencia a flexión o MOR, se utiliza la resistencia a flexión efectiva en el programa de diseño de pavimentos.

Los espesores de pavimentos de aeropuertos se diseñan con el programa FAARFIELD, el cual utiliza procedimientos de diseño empírico-mecanicista basados en elementos finitos elásticos y tridimensionales, para diseños nuevos y recapados, de pavimentos flexibles y rígidos, respectivamente. Utilizando la librería de aeronaves que tiene el programa, junto al número de despegues totales en un año de cada aeronave, FAARFIELD analiza el daño acumulativo en el pavimento para cada avión y determina un espesor final para el daño total acumulativo de todas las aeronaves en evaluación. Cuando el factor de daño acumulativo (CDF) llega a una sumatoria igual a 1, el pavimento cumple con las condiciones de diseño estructural [U.S. Department of Transportation FAA, 2016 A].

En la Figura 3.4 se muestra la interfaz de los datos de entrada para diseñar un pavimento rígido en aeropuertos. En el recuadro rojo se ingresa el valor de resistencia a flexión efectiva del hormigón

(valores de la Tabla 3.4) el cual tiene un valor de 6,20 dado que es el máximo que permite el programa FAARFIELD; en el recuadro amarillo el espesor de la base chancada que en este caso no se variará dado que todo lo que no sea hormigón se quiere mantener constante, con el fin de comparar solamente el efecto de considerar HRF; y en el recuadro azul el valor del módulo del terraplén, que puede ser calculado con la Ecuación 3.1 mostrada a continuación [U.S. Department of Transportation FAA, 2016 A], utilizando el valor de CBR especificado en la Figura 3.2.

$$K = 28,6926 \cdot CBR^{0,7788} \text{ [psi]} \quad (3.1)$$

The screenshot shows the FAARFIELD v 1.42 software interface. The title bar reads 'FAARFIELD v 1.42 - Modify and Design Section NewRigid01 in Job AMB'. The main window is divided into several sections:

- Section Names:** A list on the left containing 'NewRigid01'.
- Design Parameters:** At the top right, 'AMB NewRigid01' and 'Des. Life = 20' are displayed.
- Layer Table:** A table with columns 'Layer Material', 'Thickness (mm)', and 'Modulus or R (MPa)'.

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
PCC Surface	355.8	6.20
Non-Standard Structure		
P-209 Cr Ag	300.0	554.12
Subgrade	k = 80.3	206.84
- Design Status:** Below the section names, it says 'Design Stopped 641.43; 641.26'.
- Buttons:** At the bottom, there are buttons for 'Back', 'Help', 'Life', 'Modify Structure', 'Design Structure', and 'Save Structure'. A green box highlights the 'Airplane' button.
- Additional Info:** At the bottom of the layer table, it says 'N = 1; PCC CDF = 1.00; t = 655.8 mm'.

Figura 3.4. Interfaz del programa FAARFIELD donde se muestran los datos de entrada exigidos para el diseño de un pavimento de hormigón reforzado con fibras, además de los años de vida útil de diseño (parte superior) correspondiente a 20 años.

En el recuadro verde de la Figura 3.4 se ingresa la solicitud correspondiente a las aeronaves. En la Tabla 3.5 se muestran los nombres de estas aeronaves, junto a su peso en kilogramos y número de despegues anuales, para diseñar el pavimento de aeropuerto en FAARFIELD. Cabe destacar que para determinar las aeronaves de diseño, se realiza un estudio y proyección de demanda del Aeropuerto, identificando las aeronaves actuales, futuras y el crecimiento de operaciones en un periodo de 20 años.

Tabla 3.5. Solicitaciones para diseñar el pavimento de hormigón reforzado con fibras en Aeropuerto Arturo Merino Benítez.

Nº	Aeronave	Peso [kg]	Despegues Anuales
1	A319-100 std	64.400	16.919
2	A318-100 std	56.400	1.000
3	A320-200 twin std	73.900	40.844
4	A321-100 std	83.400	62.000
5	A340-300 std	275.895	7.725
6	A340-300 std Belly	275.895	7.725
7	A340-600 std	366.200	3.000
8	A340-600 std Belly	366.200	3.000
9	A380	562.000	72
10	A380 Belly	562.000	72
11	Adv. B727-200C Basic	84.005	1.031
12	B737-300	63.503	913
13	B737-500	60.781	1.857
14	B737-800	79.243	3.623
15	B767-200	163.747	811
16	B767-300	163.747	23.639
17	B777-200 Baseline	248.115	3.574
18	B777-300 Baseline	300.278	3.574
19	B747-8	449.056	143
20	B747-8 Belly	449.056	143
21	Adv. B737-200 QC	58.332	26.025
22	B737-700	70.307	5.465
23	MD11ER	287.124	1.514
24	MD11ER Belly	287.124	1.514

En la Figura 3.5 se muestra una imagen de la interfaz del programa FAARFIELD con los datos de aeronaves ingresados.

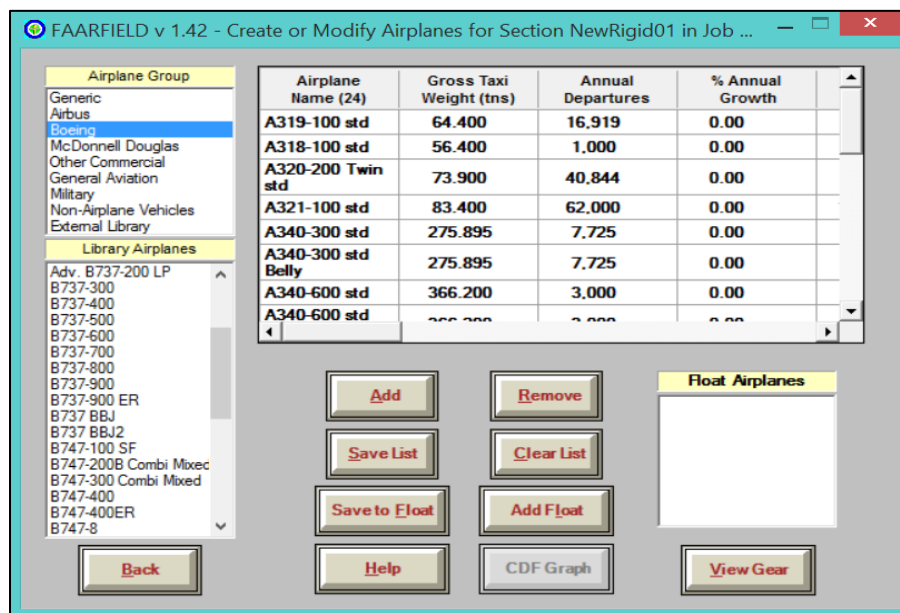


Figura 3.5. Interfaz del programa FAARFIELD al ingresar aeronaves, junto a su peso y despegues anuales.

Luego de ingresados los datos de entrada se procede a diseñar la estructura. El diseño se detiene cuando el valor de CDF llega a 1, como se muestra en el gráfico de la Figura 3.6, entregando el programa el espesor de diseño del pavimento de hormigón (recuadro morado mostrado en la Figura 3.4).

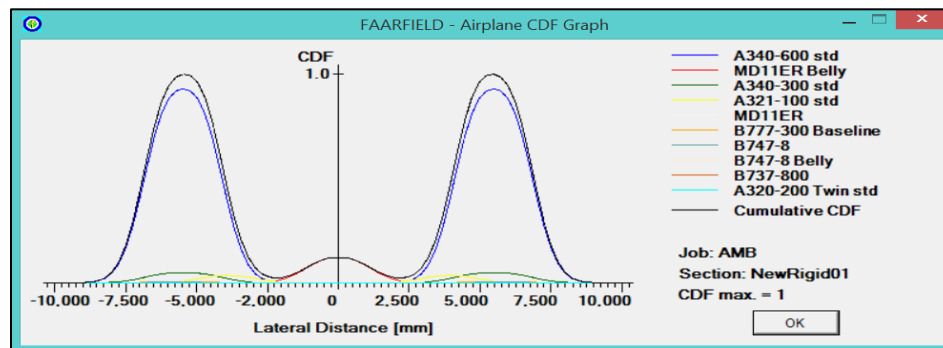


Figura 3.6. Gráfico de CDF en función de la distancia lateral de las ruedas al eje central de la aeronave, el cual calza con el de la pista, para el diseño de pavimento de HRF.

Con el fin de verificar el espesor diseñado actualmente en el proyecto que no utiliza fibras, correspondiente a 45 cm, se realiza el mismo procedimiento anterior, con la diferencia de ingresar el valor de 4,8 MPa en la resistencia a flexión del hormigón (recuadro rojo), la cual corresponde a la resistencia del hormigón cuando no se incorporan fibras a la mezcla. Esto se visualiza mejor en la Figura 3.7.

FAARFIELD v 1.42 - Modify and Design Section NewRigid01 in Job AMB2

Section Names
NewRigid01

AMB2 NewRigid01 Des. Life = 20

Layer Material	Thickness (mm)	Modulus or R (MPa)
PCC Surface	443.0	4.80
Non-Standard Structure		
P-209 Cr Ag	300.0	554.12
Subgrade	k = 80.3	206.84

N = 1; PCC CDF = 1.00; t = 743.0 mm

Design Stopped 723.41; 723.16

Airplane

Back Help Life Modify Structure Design Structure Save Structure

Figura 3.7. Interfaz del programa FAARFIELD donde se muestran los datos de entrada exigidos para el diseño de un pavimento de hormigón convencional (sin fibra), además de los años de vida útil de diseño (parte superior) correspondiente a 20 años.

De la Figura 3.7 se extrae el valor del espesor de diseño para el pavimento de hormigón convencional, el cual corresponde a 443 mm, es decir, 45 cm, por lo que queda verificado el diseño original. En la Figura 3.8 se corrobora el correcto diseño al observar que el gráfico de CDF llega a 1.

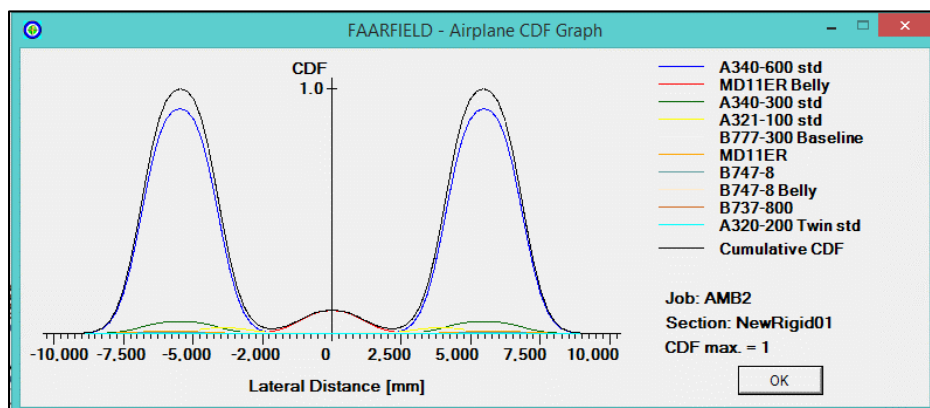


Figura 3.8. Gráfico de CDF en función de la distancia lateral de las ruedas al eje central de la aeronave, el cual calza con el de la pista, para el diseño de pavimento convencional sin fibras.

Luego de utilizar el programa para introducir los distintos valores de resistencia a flexión efectiva, f_{eff} , mostrados anteriormente en la Tabla 3.4, es posible obtener distintos espesores de diseño de pavimento, los cuales se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Espesor de diseño calculado por el programa FAARFIELD para cada dosis de cada fibra BarChip o Sika.

Nombre Fibra	BarChip 48			Sika Enduro Mirage	Sin Fibra
Volumen [%]	0,33	0,38	0,44	0,38	-
Dosis [kg/m ³]	3,0	3,5	4,0	3,5	-
Resistencia Flexión Efectiva, f_{eff} [Mpa]	6,05	6,25*	6,45	6,00	4,80
Espesor FAARFIELD [m]	0,37	0,36	*	0,37	0,45

* El programa FAARFIELD no admite valores de resistencia a flexión mayores a 6,20 MPa, por lo que se descarta la tercera opción de Barchip48, y se fija este valor de resistencia a flexión efectiva para la fibra Barchip48 utilizando un volumen de 0,38% de fibra.

De la Tabla 3.6 se desprende que al incorporar macrofibras sintéticas a la mezcla de hormigón, en los volúmenes permitidos para aplicaciones de pavimentos, es posible disminuir el espesor de la losa de hormigón casi 10 cm, equivalente a una reducción del 20% del valor original que no incorpora macrofibras. Cabe destacar que esta reducción en el espesor de losa permite mantener la vida útil actual de un pavimento de hormigón sin fibra, por lo que se está privilegiando la reducción de espesor frente al aumento en la vida útil.

3.4 Factibilidad Técnica – Económica del Uso de HRF

Con los precios de las fibras entregados en la Tabla 3.2, junto con los resultados de los espesores de diseño calculados por el programa FAARFIELD en la Tabla 3.6 para cada dosis y tipo de fibra, es posible realizar un estudio de factibilidad económica para evaluar que tan conveniente resultaría implementar un pavimento de hormigón reforzado con fibra en lugar de un pavimento de hormigón convencional.

Para escoger el tipo de macrofibra más conveniente, se calcula el volumen de hormigón necesario para cubrir la superficie del proyecto, para cada espesor determinado anteriormente. Luego al multiplicar el volumen de hormigón por el contenido de macrofibras en la mezcla [kg/m^3] se obtiene el peso en kilogramos de macrofibra total a utilizar en el proyecto. En la Tabla 3.7 se observan los resultados de estos parámetros.

Tabla 3.7. Volumen de hormigón y cantidad de fibra necesaria para cubrir la superficie de la Calle de Rodaje Kilo.

Nombre Fibra	BarChip 48		Sika
Opción	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Espesor Hormigón [m]	0,37	0,36	0,37
Área Calle Rodaje Kilo [m^2]	16.740	16.740	16.740
Volumen Hormigón [m^3]	6.194	6.027	6.194
Dosis fibra [kg/m^3]	3,0	3,5	3,5
Fibra total [kg]	18.581	21.092	21.678

De la Tabla 3.7 se observa como la segunda opción de la fibra BarChip48, de dosis de fibra correspondiente a $3,5 \text{ [kg/m}^3]$, es la que resulta en un menor volumen de hormigón necesario, para la superficie de $16.740 \text{ [m}^2]$, de las tres opciones mostradas; sin embargo, no es la opción correspondiente a una menor cantidad de fibra total requerida, por lo que se hace necesario calcular el costo del metro cúbico del hormigón reforzado con fibras y su costo en el volumen total de la superficie. En la Tabla 3.8 se muestra el costo de la fibra en 1 metro cúbico de hormigón, el costo de fibra en el volumen total de hormigón, además del costo del hormigón sin fibra y reforzado con fibra por metro cúbico y para el volumen total, y finalmente se muestra la diferencia, en precio y porcentaje, entre el hormigón sin fibra y reforzado en el volumen total de la calle de rodaje Kilo.

Tabla 3.8. Costo del hormigón reforzado con fibras por metro cúbico y volumen total.

Nombre Fibra	BarChip 48		Sika	Sin Fibras
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	
Costo kilogramo de fibra	\$ 4.000	\$ 3.500*	\$ 3.700*	-
Costo fibra en 1 m ³ de mezcla	\$ 12.000	\$ 12.250	\$ 12.950	-
Costo fibra en volumen total	\$ 74.325.600	\$ 73.823.400	\$ 80.209.710	-
Costo 1 m ³ hormigón sin fibra	\$ 71.125	\$ 71.125	\$ 71.125	\$ 71.125**
Costo 1 m ³ hormigón con fibra	\$ 83.836	\$ 84.086	\$ 84.786	-
Costo hormigón en volumen total	\$ 519.264.965	\$ 506.737.377	\$ 525.149.075	\$ 535.784.625
Diferencia de costos	\$ 16.519.660	\$ 29.047.248	\$ 10.635.550	-
Diferencia porcentual	- 3,1%	- 5,4%	- 2,0%	-

* Costo por mayor de fibra.

** Costo directo del metro cúbico de hormigón (sin IVA ni gastos generales ni utilidades) extraído de la propuesta económica de la empresa adjudicada al proyecto llamada “Ingeniería y Construcciones Santa Laura SpA”

Cabe destacar que el costo directo del metro cúbico del hormigón reforzado con fibra se calcula utilizando la Ecuación 3.2.

$$HRF \left[\frac{\$}{m^3} \right] = HSF * 1,01 \left[\frac{\$}{m^3} \right] + F \left[\frac{\$}{m^3} \right] \quad (3.2)$$

Donde HRF es el costo directo del metro cúbico de hormigón reforzado con fibras, HSF el costo directo del hormigón sin fibra, multiplicado por un factor de 1,01 debido a la inclusión de superplastificante por reducción de asentamiento de la mezcla, y F es el costo directo de las fibras en un metro cúbico de la mezcla.

De la Tabla 3.8 es posible determinar que la opción 2 de BarChip48, de dosis 3,5 [kg/m³], es la que ocasiona una mayor diferencia en el precio final del hormigón reforzado con fibra respecto al hormigón sin fibras, alcanzando un 5,4% de ahorro de dinero para el volumen total de hormigón requerido en el proyecto y un 20% de ahorro en los metros cúbicos de hormigón necesario. Por lo tanto, el costo directo del metro cúbico de hormigón reforzado con fibras es de \$84.086 + Gastos Generales + Utilidades + IVA. Finalmente, se realizan dos presupuestos del proyecto a nivel de calle de rodaje Kilo; el primero, entregado por la empresa adjudicada, para hormigón sin fibra, y el segundo utilizando hormigón reforzado con macrofibra sintética BarChip48 en dosis de 3,5 [kg/m³].

3.4.1 Presupuesto y Programación de Calle de Rodaje Kilo sin utilizar Fibra.

A continuación, en la Tabla 3.9, se presenta el presupuesto de la conservación de la calle de rodaje kilo, entregado por la empresa adjudicada al proyecto el año 2018, “Ingeniería y Construcciones Santa Laura SpA” en su oferta económica. Además, se detallan las cantidades cubicadas de cada ítem.

Tabla 3.9. Cubicación y presupuesto para la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón sin fibras. Precios equivalentes al costo directo, no incluyen gastos generales ni IVA.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN.	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1.1	Remoción de Pavimentos de Hormigón	m ³	5.189	\$ 12.121	\$ 62.895.869
1.2	Excavación de Corte	m ³	14.229	\$ 5.047	\$ 71.813.763
1.3	Suministro y Colocación de Material para Terraplén	m ³	6.696	\$ 9.004	\$ 60.290.784
1.4	Colocación de Base Material Chancado	m ³	5.022	\$ 20.201	\$ 101.449.422
1.5	Construcción de Pavimento de Hormigón	m ³	7.533	\$ 71.125	\$ 535.784.625
1.6	Demarcación de Pavimentos	m ²	2.177	\$ 2.800	\$ 6.095.600
1.7	Sello de Juntas	ml*	6.342	\$ 1.890	\$ 11.986.380
Subtotal Calle de Rodaje:					\$ 850.316.443
Subtotal Ayudas Visuales:					\$ 176.433.579
Costo Directo Total Calle Rodaje Kilo:					\$ 1.026.750.022

* Metro lineal.

En la Tabla 3.10 se detalla el rendimiento de cada ítem mencionado en la Tabla 3.9. Estos valores son conocidos y entregados por la empresa adjudicada en su oferta técnica. Los días de trabajo para cada ítem se calculan con la Ecuación 3.3.

$$\text{Días de Trabajo} = \frac{\text{Cantidad [m}^3\text{ o m}^2\text{ o ml]}}{\text{Rendimiento Diario}} \quad (3.3)$$

Tabla 3.10. Rendimientos para cada ítem junto a sus días de trabajo.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN.	CANT.	RENDIMIENTO [m ³ /día]	DÍAS
1.1	Remoción de Pavimentos de Hormigón	m ³	5.189	74	71
1.2	Excavación de Corte	m ³	14.229	283	51
1.3	Suministro y Colocación de Material para Terraplén	m ³	6.696	140	48
1.4	Colocación de Base Material Chancado	m ³	5.022	116	44
1.5	Construcción de Pavimento de Hormigón	m ³	7.533	94	81
1.6	Demarcación de Pavimentos	m ²	2.177	94	24
1.7	Sello de Juntas	ml	6.342	375	17

En la Figura 3.9 se observa la programación mensual de los ítems relacionados a la calle de rodaje Kilo, mostrados en la Tabla 3.10, para así obtener la cantidad de meses que durará la obra y aplicar los costos de los gastos generales.

		MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	MES 8	MES 9
ITEM	DÍAS	30	60	90	120	150	180	210	240	270
1.1	71									
1.2	51									
1.3	48									
1.4	44									
1.5	81									
1.6	24									
1.7	17									

Figura 3.9. Programación de la conservación de la calle de rodaje Kilo sin utilizar fibra.

La obra de conservación de la calle de rodaje Kilo al utilizar hormigón sin fibra tiene una duración de 172 días hábiles, correspondientes a un total de 256 días, u 8,5 meses. Para efectos de gastos generales, se considera un total de 9 meses de gastos. En la Tabla 3.11 se muestra el detalle de los gastos generales para esta cantidad de meses. Estos datos son extraídos de la oferta económica de la empresa adjudicada “Ingeniería y Construcciones Santa Laura SpA”.

Tabla 3.11. Gastos Generales para 9 meses de la obra de conservación de la calle rodaje Kilo utilizando hormigón sin fibra. Precios sin IVA.

DESCRIPCIÓN	UN.	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Personal Directivo y Administrativo	Mes	9	\$ 8.579.152	\$ 77.212.369
Personal Auxiliar	Mes	9	\$ 3.061.512	\$ 27.553.607
Topografía	Mes	9	\$ 6.386.702	\$ 57.480.319
Laboratorio	Mes	9	\$ 4.735.446	\$ 42.619.014
Insumo Instalaciones	Mes	9	\$ 4.476.636	\$ 40.289.728
Movilización	Mes	9	\$ 4.642.556	\$ 41.783.008
Combustible	Mes	9	\$ 909.677	\$ 8.187.094
Viáticos	Mes	9	\$ 1.529.283	\$ 13.763.543
Traslado de Maquinaria	Uni	9	\$ 785.141	\$ 7.066.269
Gastos de Oficina y Representación	Mes	9	\$ 384.371	\$ 3.459.336
Seguridad	Mes	9	\$ 2.690.902	\$ 24.218.116
Oficina Central	Mes	9	\$ 8.498.720	\$ 76.488.478
Total Gastos Generales para Calle Rodaje Kilo				\$ 420.120.881

Cabe destacar que el ítem de “Fotografía y Laboratorio” (cuya unidad de medida es global), no se muestra en la Tabla 3.11 dado que, independiente de la duración de las obras, tendrá el mismo precio unitario de \$500.000, aumentando el valor total de gastos generales a \$420.620.881.

En la Tabla 3.12 se muestra el detalle completo del costo asociado a la conservación de la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón sin fibra. Para el cálculo del porcentaje de gastos generales se utiliza la Ecuación 3.4.

$$\% \text{Gastos Generales} = \frac{\text{Gastos Generales}}{\text{Costo Directo}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Tabla 3.12. Total neto y con IVA incluido para la obra utilizando hormigón sin fibra.

Costo Directo	\$ 1.026.750.022
Gastos Generales	\$ 420.620.881
% Gastos Generales	40,97%
Utilidades	\$ 92.407.502
% Utilidades*	9%
Total Neto	\$ 1.539.778.405
IVA (19%)	\$ 292.557.897
Total	\$ 1.832.336.302

* Estipulados en la oferta económica de la empresa adjudicada.

3.4.2 Presupuesto y Programación de Calle de Rodaje Kilo utilizando HRF.

En la Tabla 3.13 se detalla la cubicación y presupuesto de la conservación de la calle de rodaje Kilo si se utiliza hormigón reforzado con fibra sintética BarChip48. Como se menciona anteriormente, para efectos de comparar solo el ítem de hormigón, las cantidades y precios de los otros ítems relacionados a la base y terraplén, se mantienen constantes, mientras que la cantidad y precio del hormigón reforzado varían.

Tabla 3.13. Cubicación y presupuesto para la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón reforzado con fibras sintéticas BarChip48. Precios equivalentes al costo directo, no incluyen gastos generales ni IVA.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANT.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1.1	Remoción de Pavimentos de Hormigón	m ³	5.189	\$ 12.121	\$ 62.895.869
1.2	Excavación de Corte	m ³	12.722	\$ 5.047	\$ 64.209.953
1.3	Suministro y Colocación de Material para Terraplén	m ³	6.696	\$ 9.004	\$ 60.290.784
1.4	Colocación de Base Material Chancado	m ³	5.022	\$ 20.201	\$ 101.449.422
1.5	Construcción de Pavimento de Hormigón	m ³	6.027	\$ 84.086	\$ 506.786.322
1.6	Demarcación de Pavimentos	m ²	2.177	\$ 2.800	\$ 6.095.600
1.7	Sello de Juntas	ml	6.342	\$ 1.890	\$ 11.986.380
Sub Total Calle Rodaje Kilo:					\$ 813.714.330
Sub Total Ayudas Visuales:					\$ 176.433.579
Costo Directo Total Calle Rodaje Kilo:					\$ 990.147.909

En la Tabla 3.14 se detallan los días de trabajo dedicados a cada ítem, utilizando los mismos rendimientos mostrados en la Tabla 3.10.

Tabla 3.14. Rendimientos para cada ítem junto a sus días de trabajo.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN.	CANT.	RENDIMIENTO [m³/día]	DÍAS
1.1	Remoción de Pavimentos de Hormigón	m³	5.189	74	71
1.2	Excavación de Corte	m³	12.722	283	45
1.3	Suministro y Colocación de Material para Terraplén	m³	6.696	140	48
1.4	Colocación de Base Material Chancado	m³	5.022	116	44
1.5	Construcción de Pavimento de Hormigón	m³	6.027	94	65
1.6	Demarcación de Pavimentos	m²	2.177	94	24
1.7	Sello de Juntas	ml	6.342	375	17

Dado que las cantidades de volumen de base y terraplén se mantienen constantes respecto al proyecto de hormigón sin fibra, la cubicación de excavación de corte (además de la cantidad de hormigón) varía, dado que en el proyecto original, se debía excavar 85 cm de profundidad para dar cabida a una losa de hormigón de 45 cm de espesor; mientras que al utilizar HRF, esta excavación disminuyó a 76 cm de profundidad para dar lugar a losas de hormigón con fibra de 36 cm de espesor. Debido a esta reducción en las cubicaciones, es posible observa en la Figura 3.10 que la programación total de los ítems relacionados a la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón reforzado con fibra logra reducirse.

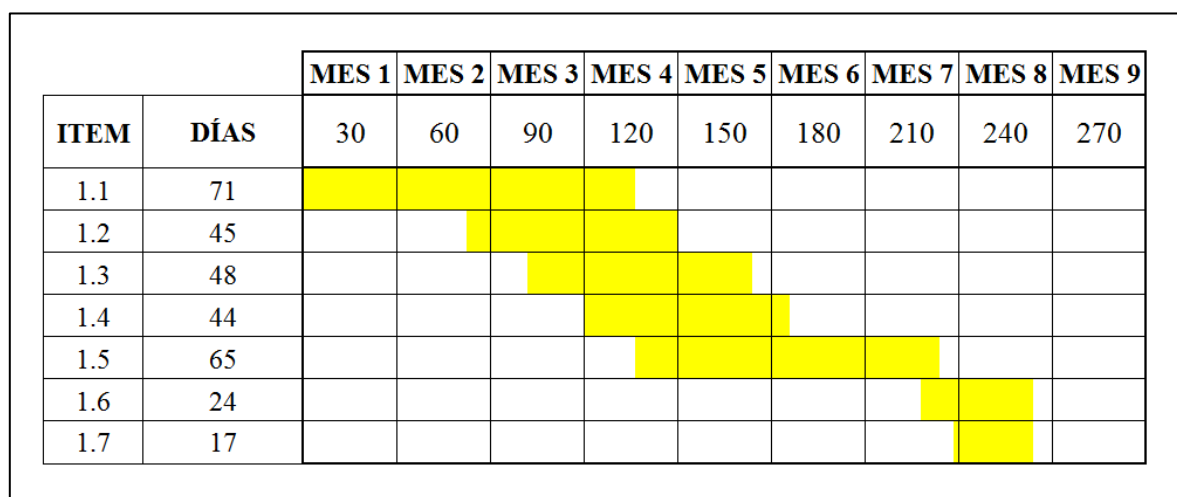


Figura 3.10. Programación de la conservación de la calle de rodaje Kilo utilizando HRF.

La obra de conservación de la calle de rodaje Kilo al utilizar hormigón reforzado con fibra tiene una duración de 156 días hábiles, correspondientes a un total de 232 días de corrido, o 7.7 meses.

Para efectos de gastos generales, se considera un total de 8 meses de gastos. Para obtener los costos asociados a los gastos generales en 8 meses, se realiza una proporción simple, mostrada en la Ecuación 3.5, resultando en un total de \$373.940.783 para los 8 meses de obra.

$$GG_{8 \text{ meses}} = 8 \cdot \frac{GG_{9 \text{ meses}}}{9} + \$500.000 \quad (3.5)$$

Cabe destacar que en la ecuación anterior, el valor de \$500.000 corresponde al precio global de los gastos de fotografía y planos, el cual, como se menciona anteriormente, se mantiene invariante a pesar de la duración de las obras.

En la Tabla 3.15 se muestra el detalle completo del costo asociado a la conservación de la calle de rodaje Kilo utilizando hormigón reforzado con fibra sintética BarChip48.

Tabla 3.15. Valor total neto y con IVA incluido para la obra utilizando hormigón sin fibra.

Costo Directo	\$ 990.147.909
Gastos Generales	\$ 373.940.783
% Gastos Generales	37,77%
Utilidades	\$ 89.113.312
% Utilidades	9%
Total Neto	\$ 1.453.202.003
IVA (19%)	\$ 2276.108.381
Total	\$ 1.729.310.384

3.4.3 Comparación de Presupuestos Conservación Calle Rodaje Kilo.

A modo de evaluar que tan conveniente resulta implementar hormigón reforzado con fibra BarChip48 en lugar del hormigón convencional, en las Tablas 3.16 y 3.17 se muestran los ahorros obtenidos con la incorporación de macrofibras a la mezcla.

Tabla 3.16. Ahorro del ítem “Construcción de Pavimento de Hormigón” al utilizar o no hormigón reforzado.

	Hormigón Sin Fibra	Hormigón Con Fibra	Ahorro	
Volumen [m ³]	7.533	6.027	1.506	20%
Costo Directo [\$/m ³]	\$ 71.125	\$ 84.086	- \$ 12.961	-18,2%
Costo Directo Volumen Total	\$ 535.784.625	\$ 506.786.322	\$ 28.998.303	5,4%

Al incorporar macrofibras a la mezcla de hormigón, se obtiene un pavimento más resistente a la flexotracción, y por lo tanto se puede reducir el espesor de losa de hormigón y mantener la vida útil del pavimento como si fuera de hormigón convencional. Al reducir el espesor de la losa, se reduce

el volumen (m³) total de hormigón del proyecto en un 20%, lo que a su vez disminuye tiempos en la programación de la obra y, por ende, también gastos generales. Por otro lado, pese a que el valor del metro cúbico es más alto en el caso de un HRF, dado el precio de las macrofibras, al multiplicarlo por el volumen total del proyecto, resulta en un ahorro de 5,4% de dinero, equivalente a \$28.998.303.

Tabla 3.17. Ahorro del proyecto de conservación de la calle de rodaje Kilo al utilizar o no hormigón reforzado.

	Hormigón Sin Fibra	Hormigón Con Fibra	Ahorro	
Costo Directo CR Kilo	\$ 1.026.750.022	\$ 990.147.909	\$ 36.602.113	3,6%
Gastos Generales	\$ 420.620.881	\$ 373.940.783	\$ 46.680.098	11,1%
% Gastos Generales	40,97%	37,77%		
Utilidades	\$ 92.407.502	\$ 89.113.312	\$ 3.294.190	3,6%
% Utilidades	9%	9%		
TOTAL NETO	\$ 1.539.778.405	\$ 1.453.202.003	\$ 86.576.401	5,6%
IVA (19%)	\$ 292.557.897	\$ 276.108.381	\$ 16.449.516	5,6%
TOTAL	\$ 1.832.336.302	\$ 1.729.310.384	\$ 103.025.917	5,6%

Al observar los datos de la Tabla 3.17, se hace evidente notar un ahorro de 83,3 millones de pesos, entre costo directo y gastos generales, para el proyecto de conservación de calle rodaje Kilo, al utilizar hormigón reforzado con fibras, presentando en el valor final un ahorro de un 5,6%, pese a que el valor unitario del hormigón reforzado es mayor que el convencional.

3.4.4 Comparación de Presupuestos Proyecto Completo.

En la Tabla 3.18 se detalla el ahorro que se tiene al utilizar hormigón reforzado con macrofibra sintética BarChip48 en el proyecto completo, es decir, en la conservación de pista 17L-35R y calle de rodaje Kilo, respecto de la implementación de pavimento de hormigón convencional.

Tabla 3.18. Ahorro del proyecto completo, pista y calle de rodaje, al utilizar o no HRF.

	Hormigón Sin Fibra	Hormigón Con Fibra	Ahorro	
Costo Directo Proyecto	\$ 2.225.918.862	\$ 2.190.157.579	\$ 35.761.283	1,6%
Gastos Generales	\$ 911.341.570	\$ 820.257.413	\$ 91.084.157	10,0%
% Gastos Generales	40,94%	37,45%		
Utilidades	\$ 200.249.182	\$ 197.114.182	\$ 3.135.000	1,6%
% Utilidades	9%	9%		
TOTAL NETO	\$ 3.337.509.614	\$ 3.207.529.174	\$ 129.980.440	3,9%
IVA (19%)	\$ 634.126.827	\$ 609.430.543	\$ 24.696.284	3,9%
TOTAL	\$ 3.971.636.441	\$ 3.816.959.717	\$ 154.676.723	3,9%

De la Tabla 3.18 es notorio un ahorro de aproximadamente 127 millones de pesos, entre costo directo y gastos generales, para el proyecto completo del Aeropuerto Arturo Merino Benítez (Pista

17L-35R y Calle Rodaje Kilo), al utilizar hormigón reforzado con fibras. Presentando, en el valor final un ahorro de un 3,9%, por lo que queda en evidencia la conveniencia económica de utilizar este tipo de tecnología en los Aeropuertos de Chile.

Si se realiza el supuesto de que todos los pavimentos rígidos aeroportuarios en Chile, equivalente a un área de 2,58 millones de metros cuadrados, tienen espesor de 0,45 m, al utilizar fibra sintética en las dosis permitidas logrando una disminución del espesor a 0,36 m, existiría un ahorro de 20% del volumen de hormigón en metros cúbicos, correspondiente a 232.000 m³ y un ahorro del 5% del costo directo del total de hormigón requerido, equivalente a 4.477 millones de pesos.

Además, existen otros factores que están directamente relacionados con la aplicación del hormigón reforzado con fibra, como por ejemplo, el impacto positivo que se obtiene en la operatividad del aeropuerto, al disminuir la duración de las obras, el aeropuerto estaría disponible 1 mes antes en este proyecto. Por otro lado, se facilitarían los procesos de conservación, debido a que en la mayoría de los casos, el diseño estructural contempla aumentar el espesor del pavimento, y como no se puede subir la rasante, se traduce en excavar y rehacer una estructura completa. La incorporación de fibras permitirá mantener espesores, mejorando la capacidad de las pistas. Finalmente, es posible disminuir la huella de carbono al disminuir el tiempo de las obras y al disminuir también la cantidad de hormigón que se requiere, impactando positivamente en el medio ambiente.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El presente trabajo de tesis cumple con los objetivos planteados al inicio de este informe. Se logra realizar un estudio que contenga una completa revisión bibliográfica basada en la experiencia nacional e internacional, además de definir algunos parámetros de diseño y especificaciones de construcción de un pavimento de hormigón reforzado con fibra; y finalmente, se evalúa la factibilidad técnica – económica para implementar este tipo de tecnología en los aeropuertos de Chile, específicamente en calles de rodaje.
- La inclusión de fibras a la mezcla de hormigón le otorga una disminución de asentamiento y por lo tanto la mezcla se vuelve más rígida y menos trabajable, además podría causar apelotonamiento en el hormigón. Para contrarrestar estos efectos negativos, se pueden utilizar superplastificantes o superfluidificantes. Sin embargo, para no modificar mucho estos valores, se recomienda utilizar dosis de fibra de hasta 0,5% del total del volumen de la mezcla en aplicaciones de pavimentos o recapados de hormigón, así también se evita modificar el diseño de mezcla, como la gradación o tamaño de agregados.
- Dentro de los principales beneficios de incorporar macrofibras a la mezcla de hormigón en dosis de hasta 0,5% se encuentran una disminución sustancial en la aparición, número y ancho de grietas por contracción plástica, siendo la fibra sintética quien tiene un mejor control de grietas respecto de los otros materiales fibrosos. Además, la presencia de fibras propicia, proporcionalmente a su contenido, una mejoría notable en la resistencia a la abrasión y al impacto del hormigón. Una vez que se presenta la primera grieta se requiere mayor número de impactos para que se presente la última grieta en hormigones fabricados con macrofibra, ya sea de acero o sintética.
- La propiedad del hormigón que se ve considerablemente beneficiada por la presencia de las macrofibras en la mezcla es la tenacidad, equivalente al área bajo la curva de la respuesta carga – deflexión hasta los 3 mm de una viga ensayada siguiendo las instrucciones la norma ASTM C1609. Conforme se incrementa el contenido de fibra, la tenacidad, dureza y capacidad de deformación del hormigón, aumentan proporcionalmente para ambos tipos de fibra, acero y sintética. Los importantes beneficios detallados anteriormente resultan en un aumento en la durabilidad del pavimento, y por lo tanto multiplica su vida útil.
- Cabe destacar que la incorporación de macrofibras en dosis de hasta 0,5% no aumentan la resistencia a tracción o compresión del hormigón, y tampoco aportan en aumentar o

disminuir la resistencia a flexión o módulo de ruptura (MOR) del hormigón. Por lo tanto, pese a que las fibras pueden reemplazar el reforzamiento secundario del hormigón, como la malla electrosoldada, dado que tienen un desempeño más eficiente debido a que es un refuerzo tridimensional que permite proteger el elemento en todas las direcciones, no se deben utilizar para reemplazar el reforzamiento primario (barras de amarre y traspaso de carga).

- La presencia de las fibras permite diseñar pavimentos de hormigón de espesores más delgados, por medio del uso de la resistencia a flexión efectiva, f_{eff} , la cual toma en cuenta los beneficios de las fibras a través de la resistencia residual, f_{150} , y los suma a la resistencia a flexión del hormigón. Distintas dosis y tipos de macrofibras pueden alcanzar el mismo nivel de resistencia residual en el ensayo ASTM C1609, por lo tanto, siempre es recomendable realizar lotes de prueba para cada fibra y verificar su cumplimiento de resistencia mediante ensayos de laboratorio.
- Al diseñar en programas de pavimento convencionales con la resistencia a flexión efectiva en lugar de la resistencia a flexión como dato de entrada, se obtienen espesores de losa de un 20% más delgados al utilizar hormigón reforzado con fibras que otorgan una resistencia residual de 1.4 MPa, lo que se traduce también en un 20% menos de volumen de hormigón necesario para cualquier área de estudio.
- Pese a que el metro cúbico del hormigón reforzado con fibras es más alto que el del hormigón convencional, aproximadamente un 18% más costoso, el precio del hormigón necesario para cubrir un área específica es un 5% menor al utilizar hormigón reforzado con fibras, producto de la menor cantidad de metros cúbicos requeridos. Y por esto último, la programación de la obra también se acorta, pudiendo durar una menor cantidad de meses y por lo tanto ahorrar en gastos generales asociados.
- En cuanto a la mantención del pavimento de hormigón reforzado con fibra, al reducir espesores de losa, la vida útil se mantiene constante con la de un pavimento de hormigón convencional; por el contrario, si se mantiene el mismo espesor utilizando hormigón reforzado, la vida útil del pavimento aumenta respecto de este mismo construido con hormigón convencional.
- Finalmente, queda demostrado que el hormigón reforzado con fibras en aplicaciones de pavimentos de aeropuertos es más eficiente que el hormigón convencional, en términos de dinero y tiempo ahorrado, por lo que vale la pena implementar este tipo de tecnología en Chile.

4.2 Recomendaciones

- Pese a que la eficiencia de transferencia de carga en losas ha sido evaluada en análisis de elementos finitos, ensayos de laboratorio de vigas y losas a gran escala y escala real, aún hay evidencia insuficiente en la contribución de las fibras a largo plazo en la eficiencia de transferencia de carga en juntas de contracción, por lo que es necesario realizar más estudios que permitan cuantificar este atributo en el diseño de un HRF.
- Los datos actuales provenientes de ensayos en terreno para evaluar la vida útil de un pavimento de HRF cuando se mantiene el espesor del hormigón convencional, son insuficientes, por lo que se requieren más ensayos a escala real que permitan determinar la servicialidad de un HRF cuando no se disminuye el espesor de losa.
- Dada la contingencia actual sobre el cambio climático y el calentamiento global, sería de gran utilidad realizar un estudio sobre los distintos tipos de fibras sintéticas que provienen del reciclaje de plásticos e implementarlas en aplicaciones de pavimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM C 1609. (2019). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1399. (2015). Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

ASTM C 1550. (2020). Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

Altoubat, S., J. R. Roesler, and K. A. Rieder. (2004). Flexural Capacity of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Slabs on Ground Based on Beam Toughness Results, in di Prisco, M., Felicetti, R., and Plizzari, G. A. eds. Proceedings of the Sixth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes. RILEM.

Altoubat, S. A., J. R. Roesler, D. A. Lange, and K. A. Rieder. (2008). Simplified Method for Concrete Pavement Design with Discrete Structural Fibers. Construction and Building Materials, Vol. 22.

ACI Committee 544. (2010). Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete, ACI 544.5R-10. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

Banthia, N., V. Bindiganavile, J. Jones, and J. Novak. (2012). Fiber-Reinforced Concrete in Precast Concrete Applications: Research Leads to Innovative Products, PCI Journal.

Barchip. (2019). Ficha Técnica Fibra Sintética BarChip48. www.barchip.com

Barman, M. (2014). Joint Performance Characterization of Bonded Whitetopping Overlays. PhD dissertation, University of Pittsburgh, PA.

Barman, M. and B. Hansen. (2018). Comparison of Performances of Structural Fibers and Development of a Specification for Using Them in Thin Concrete Overlays. Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN.

Barman, M., J. M. Vandenbossche, and Z. Li. (2015). Characterization of Load Transfer Behavior for Bonded Concrete Overlays on Asphalt, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.

Bentur, A. and S. Mindess. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2nd Edition. Taylor & Francis, London.

Bernard, E. S. (2002). Correlations in the Behaviour of Fibre Reinforced Shotcrete Beam and Panel Specimens, *Materials and Structures*, Vol. 35, No. 3, pp. 156–164. doi: 10.1007/BF02533584.

Bernard, E. S. (2009). Influence of Test Machine Control Method on Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete Beams, *Journal of ASTM International*, Vol. 6.

Bernard, E. S. (2014). Influence of Friction in Supporting Rollers on the Apparent Flexural Performance of Third-Point Loaded Fiber Reinforced Concrete Beams, *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol. 3.

Blanco, A. (2008). *Durabilidad del Hormigón con Fibras de Acero*. Tesis de Pregrado. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Bordelon, A. and J. Roesler. (2012). Design with Fiber-Reinforcement for Thin Concrete Overlays Bonded to Asphalt, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 430–435.

Covarrubias, J. P., J. Roesler, and J. P. Covarrubias. (2010). Design of Concrete Slabs with Optimized Geometry. 11th International Symposium on Concrete Roads, October 13–15, Seville, Spain.

Dirección de Aeropuertos, DAP. (2016). *Especificaciones Técnicas Generales para Pavimentos de Hormigón Hidráulico*, ETG N°16. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Dirección de Aeropuertos, DAP. (2018). *Antecedentes de Licitación Proyecto Conservación Mayor Pista 17L-35R y Rodajes Asociados Aeropuerto A.M.B*. Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Elsaigh, W., E. Kearsley, and J. Robberts. (2005). *Steel Fiber Reinforced Concrete for Road Pavement Applications*. University of Pretoria, South África.

EN 14651. (2008). *Método de Ensayo para Hormigón con Fibras Metálicas*. Determinación de la Resistencia a la Tracción por Flexión (Límite de Proporcionalidad (LOP), Resistencia Residual). Normalización Española.

Forgeron, D. P. and J.-F. Trottier. (2004). Evaluating the Effects of Combined Freezing and Thawing and Flexural Fatigue Loading Cycles on the Fracture Properties of FRC. In *High Performance Structures and Materials II*.

- Galeote, E. A. Blanco, S. H. P. Cavalaro, and A. de la Fuente. (2017). Correlation between the Barcelona Test and the Bending Test in Fibre Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 152, pp. 529–538.
- Grdic, Z. J. G. A. Toplicic Curcic, N. S. Ristica, and I. M. Despotovic. (2012). Abrasion Resistance of Concrete Micro-Reinforced with Polypropylene Fibers. *Construction and Building Materials*, Vol. 27, No. 1, pp. 305–312.
- Harrington, D. and G. Fick. (2014). *Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements*. 3rd Edition. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA.
- Herrera, A. (2017). *Caracterización de Hormigones Reforzados con Cuantías Bajas de Fibras Sintéticas*. Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Ingeniería y Construcciones Santa Laura SpA. (2018). *Oferta Económica de Proyecto de Conservación Mayor Pista 17L-35R y Rodajes Asociados Aeropuerto A.M.B.*
- Ingeniería y Construcciones Santa Laura SpA. (2018). *Oferta Técnica de Proyecto de Conservación Mayor Pista 17L-35R y Rodajes Asociados Aeropuerto A.M.B.*
- Jeria, R. (2008). *Hormigón con Fibra*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, MOP. Chile.
- Kevern, J., T. Rupnow, M. Mulheron, Z. Collier, and P. Icenogle. (2016). Evaluation of the Fatigue and Toughness of Fiber Reinforced Concrete for Use as a New Highway Pavement Design. Louisiana Transportation Research Center, Baton Rouge, LA.
- Kim, M. O. and A. C. Bordelon. (2017a). Age-Dependent Properties of Fiber-Reinforced Concrete for Thin Concrete Overlays. *Construction and Building Materials*, Vol. 137, pp. 288–299.
- King, D. and J. R. Roesler. (2014). *Structural Performance of Ultra-Thin Whitetopping on Illinois Roadways and Parking Lots*. Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- López, J. (2015). *Análisis de las Propiedades de Concreto Reforzado con Fibras Cortas de Acero y Macrofibras de Polipropileno: Influencia del Tipo y Consumo de Fibra Adicionado*. Tesis de Magister. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Marcos-Meson, V., A. Michel, A. Solgaard, G. Fischer, C. Edvardsen, and T. L. Skovhus. (2018). Corrosion Resistance of Steel Fibre Reinforced Concrete - A Literature Review, *Cement and Concrete Research*, Vol. 103, pp. 1–20.
- Molins, C., A. Aguado, and S. Saludes. (2009). Double Punch Test to Control the Energy Dissipation in Tension of FRC (Barcelona Test), *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 42, No. 4, pp. 415–425.
- Mulheron, M., J. T. Kevern, and T. D. Rupnow. (2015). Laboratory Fatigue and Toughness Evaluation of Fiber-Reinforced Concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2508, pp. 39–47.
- Plizzari, G., A. Conforti, and R. Zerbino. (2018). Influence of Steel, Glass and Polymer Fibers on the Cracking Behavior of Reinforced Concrete Beams Under Flexure. Technical Paper. International Federation for Structural Concrete.
- Plizzari, G., V. Guerini, A. Conforti, and S. Kawashima. (2018). Influence of Steel and Macro-Synthetic Fibers on Concrete Properties. Article in *Fibers*.
- Plizzari, G., F. Micelli, L. Candido, E. Vasanelli, and M.A. Aiello. (2019). Effects of Short Fibers on the Long-Term Behavior of RC/FRC Beams Aged Under Service Loading. Article en *Applied Sciences*.
- Pujadas, P., A. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente, and A. Aguado. (2013). New Analytical Model to Generalize the Barcelona Test using Axial Displacement. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 19, No. 2, pp. 259–271.
- Pujadas, P., A. Blanco, S. H. P. Cavalaro, A. de la Fuente, and A. Aguado. (2014). Multidirectional Double Punch Test to Assess the Post-Cracking Behaviour and Fibre Orientation of FRC. *Construction and Building Materials*, Vol. 58, pp. 214–224.
- Rapoport, J., C.-M. Aldea, S. P. Shah, B. Ankenman; and A. Karr. (2002). Permeability of Cracked Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 355–358.
- Roesler, J., D. Lange, S. Altoubat, K. Rieder, and G. Ulreich. (2004). Fracture of plain and fiber-reinforced concrete slabs under monotonic loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 452–460.

Roesler, J. A. Bordelon, A. Ioannides, M. Beyer, and D. Wang. (2008). Design and Concrete Material Requirements for Ultrathin Whitetopping. Illinois Center for Transportation, University of Illinois at Urbana Champaign.

Roesler, J. R., V. G. Cervantes, and A. N. Amirkhanian. (2012). Accelerated Performance Testing of Concrete Pavement with Short Slabs, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 13, No. 6, pp. 494–507.

Roesler, J. and A. Bordelon. (2018). Fiber Reinforced Concrete Overview for Concrete Pavement and Overlays. National Concrete Consortium Webinar. Iowa State.

Roesler, J. (2019). Effect of Macrobbers on Behavior and Performance of Concrete Slabs and Overlays. Sika Seminar. Santiago, Chile.

Roesler, J., A. Bordelon, A. Brand, A. Amirkhanian. (2019). Fiber-Reinforced Concrete for Pavement Overlays. Tech Brief. National Concrete Pavement Technology Center. Iowa State University. March, 2019.

Roesler, J., A. Bordelon, A. Brand, A. Amirkhanian. (2019). Fiber-Reinforced Concrete for Pavement Overlays: Technical Overview. National Concrete Pavement Technology Center. Iowa State University. April, 2019.

Sanjuán, M. A., C. Andrade, and A. Bentur. (1997). Effect of Crack Control in Mortars Containing Polypropylene Fibers on the Corrosion of Steel in a Cementitious Matrix. ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 2, pp. 134–141.

Shah, S. P., M. Sarigaphuti, and M. E. Karaguler. (1994). Comparison of Shrinkage Cracking Performance of Different Types of Fibers and Wiremesh. In Fiber Reinforced Concrete Developments and Innovations. SP-142. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. pp. 1–18.

Shah, H. R. and J. Weiss. (2006). Quantifying Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete using the Ring Test. Materials and Structures, Vol. 39, No. 293, pp. 887–899.

Sika. (2008). Concrete, Hormigón Reforzado con Fibras. Sika Chile.

Sika. (2019). SikaFiber Enduro Mirage Product Data Sheet. Building Trust Sika.

U.S. Department of Transportation FAA. (2016) A. Airport Pavement Design and Evaluation "AC 150/5320-6F". USA.

Won, J., D. Lim, and C. Park. (2006). Bond Behaviour and Flexural Performance of Structural Synthetic Fibre-Reinforced Concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 58, No. 6, pp. 401–410.

ANEXO A

Overlay Type	Traffic (Millions of ESALs)	Typical Concrete Slab Thickness	Typical Joint Spacing (ft)	Range of Existing Pavement Condition	Recommended Design Procedure ^{a,b}
<i>Bonded Overlay</i>					
Over Asphalt Pavement	Up to 15	3–6 in.	=1.5 times thickness (in.)	Fair to Good	1, 2, 8
Over Concrete Pavement	Up to 15	3–6 in.	Match existing cracks and joints and cut intermediate joints	Fair to Good	3, 4, 5
Over Composite Pavement	Up to 15	3–6 in.	=1.5 times thickness (in.)	Fair to Good	1, 2, 8
Thin Fibrous Overlays of Asphalt Pavement	Up to 15	2–3 in.	4–6 ft	Fair to Good	7
<i>Unbonded Overlay</i>					
Over Asphalt Pavement	Up to 100	4–11 in.	Slab < 6 in.: 1.5 times thickness (in.) Slab ≥ 6 in.: 1.5 times thickness (in.) Slab > 7 in.: 15 ft	Deteriorated to Fair	3, 4, 5
Over Concrete Pavement	Up to 100	4–11 in.	Slab < 6 in.: 1.5 times thickness (in.) Slab ≥ 6 in.: 1.5 times thickness (in.) Slab > 7 in.: 15 ft	Deteriorated to Fair	3, 4, 5
Over Composite Pavement	Up to 100	4–11 in.	Slab < 6 in.: 1.5 times thickness (in.) Slab ≥ 6 in.: 1.5 times thickness (in.) Slab > 7 in.: 15 ft	Deteriorated to Fair	3, 4, 5
Short-jointed Concrete Slabs over Asphalt, Concrete, or Composite Pavement	Up to 100	> 3 in.	4–8 ft	Poor to Fair	6
^a Recommended design procedures: 1. Bonded Concrete Overlay on Asphalt Thickness Designer (ACPA): http://apps.acpa.org/applibray/BCOA/ 2. BCOA-ME (Vandenbossche et al. 2017, Li et al. 2016): http://www.engineering.pitt.edu/Vandenbossche/BCOA-ME/ 3. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO 1993) 4. AASHTO Pavement ME (AASHTO 2008) 5. Pavement Designer (ACPA): https://pavementdesigner.org/ 6. Optipave 2 (TCPavements): http://www.tcpavements.cl/eng/software 7. Flowable Fibrous Concrete for Thin Concrete Inlays (Bordelon and Roesler 2011) 8. Illinois DOT design of bonded concrete inlay/overlay of asphalt pavements (Roesler et al. 2008) ^b Macrofiber reinforcement is permitted directly in design procedures 1, 2, 6, 7, and 8 and indirectly in 3, 4, and 5. Source: Harrington and Fick 2014					

Figura A.1. Resumen de procedimientos de diseño existentes para recapados de hormigón.

ANEXO B

BarChip 48

Ficha Técnica



Refuerzo de fibra de hormigón

BarChip 48 es una fibra sintética estructural de alto rendimiento para refuerzo del concreto, optimizada para pavimentos, pisos industriales y elementos prefabricados.

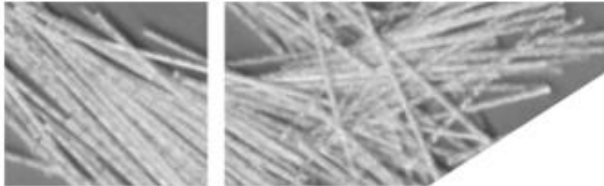
Trabaje con BarChip y juntos explotaremos al máximo el potencial de su mezcla de hormigón.

Beneficios

- Diseño integral y soporte técnico
- Redistribuye la carga – mayor ductilidad/tenacidad
- Elimina la corrosión – durabilidad a largo plazo
- Elimina la instalación de mallas de acero
- Mejora la velocidad de producción prefabricada hasta un 50%
- Mayor protección contra la abrasión y el impacto
- Reducción en un 70% de los niveles de emisión de carbono en comparación con el acero
- Más seguro y liviano de manejar que el acero
- Reducción del desgaste de bombas y mangueras para hormigón
- La fibra BarChip está estabilizada a los rayos UV para resistir el deterioro solar
- Empaque a prueba de intemperie sobre múltiples palets UPVC

Características del producto (vea la FDS para más detalles)

Característica	BarChip 48	Estándar
Clase de Fibra II	Para uso estructural en hormigón, argamasa y lechada de cemento	EN 14889-2
Resistencia a la tensión	640 MPa	JIS L 1013/ISO 2062
Módulo de Young	12 GPa	JIS L 1013/ISO 2062
Longitud	48 mm	
Anclaje	Relieve continuo	
Material de base	Polipropileno virgen	
Resistencia alcalina	Excelente	
Certificado CE		0120 - GB10/79678
Certificado ISO 9001:2015		0044943

Empaquetado en bolsas de papel y bolsas grandes para dosificación automatizada. Apilado de forma segura sobre 3 palets reciclables de UPVC.



Dosificación

BarChip 48 tiene un rango típico de dosificación de 2.5 kg a 5 kg por metro cúbico. El rango de dosificación debe ser determinado en función de los requisitos de funcionamiento. Los rangos típicos de dosificación pueden reducir la medida del slump.

Mezclado

BarChip 48 se añade junto a su respectiva bolsa a la mezcladora con agua de mezcla inicial. Adicione materiales secos y mezcle a alta velocidad para las revoluciones requeridas. Se pueden aplicar técnicas alternativas de mezclado.

Realice la optimización de la mezcla junto a los especialistas de BarChip para garantizar que obtenga un rendimiento óptimo de su mezcla de hormigón. Para más información, vea la guía de dosificación y mezclado de BarChip.

Bombeo

BarChip 48 puede ser bombeado fácilmente a través de mangueras de goma de 50 mm. Se deben tomar precauciones para asegurar que las fibras pasen libremente a través de la rejilla del equipo.

Manipulación y almacenamiento

BarChip 48 es empaquetado en bolsas de papel de 2.5 kg (440 kg por palet) y entregado en palets de plástico durable y reciclable con una capucha de lluvia equipada para permitir su almacenamiento en el exterior. Las bolsas almacenadas individualmente deben ser protegidas contra daños causados por agua.

Para más información contacte a su representante BarChip más cercano.

Cumplimiento

Cumple con la ASTM C 1116 – Tipo III
Cumple con EN 14889 - 2



The Synthetic Fibre Experts
www.barchip.com

Figura B.1. Ficha Técnica de la fibra BarChip48, hoja 1.

**Comportamiento a flexión – ASTM C 1609 / C 1609 M**Esfuerzo residual a los 0.75 mm Desplazamiento $f_{150/0.75}$ [MPa]

f'_c [MPa]	Rango de dosificación [kg/m ³]					
	2.5	3	3.5	4	5	6
25	1.10	1.35	1.60	1.85	2.35	2.85
32	1.30	1.55	1.80	2.10	2.60	3.15
40	1.50	1.80	2.05	2.35	2.90	3.50

Esfuerzo residual a los 3.0 mm Desplazamiento $f_{150/3.0}$ [MPa]

f'_c [MPa]	Rango de dosificación [kg/m ³]					
	2.5	3	3.5	4	5	6
25	0.80	1.00	1.15	1.35	1.75	2.20
32	0.90	1.10	1.30	1.50	1.95	2.40
40	1.05	1.25	1.45	1.65	2.10	2.60

Comportamiento a flexión – EN 14651, RILEMEsfuerzo Residual CMOD 0.5 mm f_{R1} [MPa]

Tipo de Hormigón	Rango de dosificación [kg/m ³]				
	2.5	3	4	5	6
C25/30	1.30	1.55	1.90	2.20	2.60
C30/37	1.35	1.55	1.95	2.30	2.70
C35/45	1.40	1.60	2.05	2.35	2.80
C40/50	1.45	1.65	2.05	2.45	2.90

Esfuerzo Residual CMOD 1.5 mm f_{R2} [MPa]

Tipo de Hormigón	Rango de dosificación [kg/m ³]				
	2.5	3	4	5	6
C25/30	1.35	1.60	2.05	2.55	3.15
C30/37	1.35	1.60	2.15	2.80	3.40
C35/45	1.40	1.65	2.20	3.00	3.50
C40/50	1.45	1.75	2.30	3.05	3.60

Esfuerzo Residual CMOD 2.5 mm f_{R3} [MPa]

Tipo de Hormigón	Rango de dosificación [kg/m ³]				
	2.5	3	4	5	6
C25/30	1.45	1.65	2.10	2.70	3.55
C30/37	1.45	1.65	2.35	3.15	3.70
C35/45	1.50	1.70	2.40	3.20	3.80
C40/50	1.50	1.80	2.55	3.30	3.90

Esfuerzo Residual CMOD 3.5 mm f_{R4} [MPa]

Tipo de Hormigón	Rango de dosificación [kg/m ³]				
	2.5	3	4	5	6
C25/30	1.30	1.50	2.05	2.65	3.20
C30/37	1.30	1.55	2.15	2.80	3.45
C35/45	1.35	1.60	2.25	2.95	3.50
C40/50	1.35	1.70	2.40	3.05	3.75

Estos resultados se basan en muestras emitidas y probadas a la edad de 28 días en los laboratorios certificados de NATA y EMI TUV SUD.

Nota: Los valores presentados son una propuesta basada en la experiencia de resultados de pruebas a nivel mundial. Las presentes tablas ofrecen una orientación y deben ser verificadas in situ mediante las pruebas adecuadas. El rendimiento del CRF se logra por la matriz compuesta y no únicamente por las fibras. Se debe aplicar una mezcla ideal y una tecnología de aplicación para optimizar los resultados. Los especialistas de BarChip están disponibles para brindar soporte.

BarChip Inc.

info@barchip.com

N. America: +1 704 843 8401

Australia: +61 1300 131 158

EMEA: +353 (0) 1 469 3197

Asia: +65 6835 7716

S. America: +56 2 2703 1563

Brasil: +55 19 3722 2199



BarChip

BarChip Inc.

The Synthetic Fibre Experts

Los distribuidores se encuentran ubicados en otras regiones. Para detalles de contacto, visite www.barchip.com.

Aviso legal: Esta información ha sido prevista únicamente como una guía de rendimiento en condiciones específicas y supervisadas. Se le aconseja al usuario que realice su propia evaluación y use los servicios de profesionales para determinar la aptitud del producto para cualquier proyecto o aplicación en particular previo a su uso comercial. ISO 9001:2015. © BarChip Inc. PS48_2019_2_SPA

www.barchip.com

Figura B.2. Ficha Técnica de la fibra BarChip48, hoja 2.